

UNIVERSITE DE NANTES
UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

ANNEE 2018

N°

**INTERÊT CLINIQUE DE LA NAVIGATION
IMPLANTAIRE DYNAMIQUE
LE POINT SUR LA LITTERATURE**

THESE POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR
EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement par

Yves-Marie TREGOUËT

Né le 07/03/1990

Le 15/05/2018 devant le jury ci-dessous :

Président : M. Le Professeur Bernard Giumelli

Assesseur : M. Le Docteur François Bodic

Assesseur: M. Le Docteur Amine Abbas

Invité : M. Le Docteur Philippe Laperche

Directeur de thèse : M. Le Docteur Alain Hoornaert

| UNIVERSITÉ DE NANTES | | |
|---|---|--|
| Président | Pr LABOUX Olivier | |
| FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE | | |
| Doyen | Pr GIUMELLI Bernard | |
| Assesseurs | Dr RENAUDIN Stéphane Pr SOUEIDAN Assem Pr WEISS Pierre | |
| Professeurs des Universités Praticiens hospitaliers des C.S.E.R.D. | | |
| Monsieur AMOURIQ Yves Monsieur GIUMELLI Bernard Monsieur LE GUEHENNEC Laurent Monsieur LESCLOUS Philippe | Madame ALLIOT-LICHT Brigitte Madame PEREZ Fabienne Monsieur SOUEIDAN Assem Monsieur WEISS Pierre | |
| Professeurs des Universités | | |
| Monsieur BOULER Jean-Michel | | |
| Professeurs Emérites | | |
| Monsieur BOHNE Wolf | Monsieur JEAN Alain | |
| Praticiens Hospitaliers | | |
| Madame DUPAS Cécile (Praticien Hospitalier) Madame LEROUXEL Emmanuelle (Praticien Hospitalier) | Madame HYON Isabelle (Praticien Hospitalier Contractuel) Madame GOEMAERE GALIERE Hélène (Praticien Attaché) | |
| Maîtres de Conférences des Universités Praticiens hospitaliers des C.S.E.R.D. | | |
| Monsieur AMADOR DEL VALLE Gilles Madame ARMENGOL Valérie Monsieur BADRAN Zahi Madame BLERY Pauline Monsieur BODIC François Madame DAJEAN-TRUTAUD Sylvie Madame ENKEL Bénédicte Monsieur GAUDIN Alexis Monsieur HOORNAERT Alain Madame HOUCHMAND-CUNY Madline Madame JORDANA Fabienne Monsieur KIMAKHE Saïd Monsieur LE BARS Pierre Madame LOPEZ-CAZAUX Serena Monsieur NIVET Marc-Henri Madame RENARD Emmanuelle Monsieur RENAUDIN Stéphane Madame ROY Elisabeth Monsieur STRUILLOU Xavier Monsieur VERNER Christian | Assistants Hospitaliers Universitaires des C.S.E.R.D. | |
| | Monsieur ABBAS Amine) Monsieur AUBEUX Davy Madame BARON Charlotte Madame BEURAIN-ASQUIER Mathilde Madame BERNARD Cécile Monsieur BOUCHET Xavier Madame BRAY Estelle Madame CLOITRE Alexandra Madame LE LAUSQUE Julie Madame LEMOINE Sarah Monsieur LOCHON Damien Madame MERCUSOT Marie-Caroline Monsieur NEMIROVSKY Hervé Monsieur OUVREARD Pierre Monsieur RÉTHORÉ Gildas Monsieur SARKISSIAN Louis-Emmanuel Madame WOJTIUK Fabienne | |
| Maître de Conférences | | |
| Madame VINATIER Claire | | |
| Enseignants Associés | | |
| Monsieur KOUADIO Ayepa Madame LOLAH Aoula | Madame MERAMETDJIAN Laure Madame RAKIC Mia | |

Par délibération, en date du 06 Octobre 1972, Le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire, a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui sont présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'il n'entend lui donner aucune approbation, ni improbation.

Remerciements

A Monsieur le Professeur GIUMELLI Bernard

Doyen de l'UFR Odontologie de Nantes
Département de Prothèse

-Nantes-

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de cette thèse.

Pour la qualité des enseignements théorique et clinique que vous m'avez prodigués pendant mes années d'études.

Veillez recevoir, Monsieur le Professeur, l'expression de ma plus grande considération et de mon plus profond respect.

A Monsieur le Docteur HOORNAERT Alain

Maître de Conférences des Universités

Praticien Hospitalier des Centres de Soins d'Enseignement et de Recherche Dentaires

Docteur de L'Université d'Orsay

Département de Sciences Anatomiques et Physiologiques,
Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysique, Radiologie

Chef du Département d'Implantologie

-Nantes-

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de diriger cette thèse.

*Pour votre disponibilité, votre patience et vos conseils précieux,
dans la rédaction de ce travail.*

*Veillez trouver ici, l'expression de ma plus grande reconnaissance
et de mon plus profond respect.*

A Monsieur le Docteur BODIC François

Maitre de conférences des Universités
Praticien hospitalier des Centres de Soins d'Enseignement et de
Recherche Dentaires
Docteur de L'Université de Nantes
Département de Prothèses

-Nantes-

*Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de siéger comme membre
du jury.*

*Pour la qualité de l'enseignement que vous m'avez prodigué
pendant mes années d'études.*

Veillez trouver ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

A Monsieur le Docteur ABBAS Amine

Assistant Hospitalier Universitaire des Centres de Soins
d'Enseignement et de Recherche Dentaires
Département de Chirurgie Buccale

-Nantes-

*Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury.
Pour m'avoir accompagné et guidé durant mes années d'études.
Veuillez accepter ici, ma plus profonde gratitude.*

A Monsieur le Docteur Philippe Laperche

Docteur en Chirurgie Dentaire

-AURAY-

Pour m'avoir fait confiance.

Pour votre disponibilité, votre pédagogie et la volonté de transmettre vos connaissances.

Pour votre considération, et votre amitié.

Veillez recevoir ici, mes plus sincères remerciements.

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 12 |
| 2 | GENERALITES EN IMPLANTOLOGIE | 14 |
| 2.1 | EVALUER LES FACTEURS DE RISQUES | 14 |
| 2.1.1 | <i>Facteurs de risques Esthétiques</i> | 15 |
| 2.1.2 | <i>Environnement Anatomique et fonctionnel</i> | 15 |
| 2.1.3 | <i>Autres.....</i> | 16 |
| 2.2 | LE PROJET PROTHETIQUE AU CENTRE DE LA THERAPEUTIQUE..... | 16 |
| 2.2.1 | <i>Le concept « prosthétic driven implantology »</i> | 16 |
| 2.2.2 | <i>L'Analyse du projet prothétique.....</i> | 17 |
| 2.2.3 | <i>Le guide radiologique.....</i> | 17 |
| 2.3 | ADEQUATION DU PROJET PROTHETIQUE AVEC LES CONTRAINTES ANATOMIQUES | 19 |
| 2.3.1 | <i>Obstacles maxillaires</i> | 19 |
| 2.3.2 | <i>Obstacles mandibulaires.....</i> | 22 |
| 2.3.3 | <i>La qualité osseuse</i> | 22 |
| 2.3.4 | <i>Définition du succès implantaire.....</i> | 24 |
| 2.4 | TECHNIQUE D'IMAGERIE | 25 |
| 2.4.1 | <i>Le scanner</i> | 25 |
| 2.4.2 | <i>Le CBCT : Cone Beam Computed Tomography.....</i> | 25 |
| 2.4.3 | <i>Le Choix dans la thérapeutique implantaire</i> | 25 |
| 2.5 | LES SYSTEMES DE NAVIGATION IMPLANTAIRE..... | 27 |
| 2.5.1 | <i>Implantologie assistée par ordinateur (IAO): Le « Flux Numérique » et le « Digital Patient ».....</i> | 27 |
| 2.5.2 | <i>La navigation mentale (13).....</i> | 28 |
| 2.5.3 | <i>La navigation active</i> | 28 |
| 2.5.4 | <i>La navigation statique ou robotique semi-active : les guides chirurgicaux(12,13)</i> | 28 |
| 2.5.5 | <i>La navigation dynamique.....</i> | 28 |
| 2.6 | LA NAVIGATION CHIRURGICALE DYNAMIQUE OU ROBOTIQUE PASSIVE OU ENCORE IGI (IMAGE GUIDED IMPLANTOLOGY)..... | 29 |
| 2.6.1 | <i>Historique.....</i> | 29 |
| 2.6.2 | <i>Principe</i> | 29 |
| 2.6.3 | <i>Les systèmes existants</i> | 30 |
| 2.6.4 | <i>Protocoles(14,20):.....</i> | 31 |
| 3 | REVUE DE LA LITTERATURE | 34 |
| 3.1 | PRECISION DE LA NAVIGATION DYNAMIQUE | 34 |
| 3.1.1 | <i>Tableaux :.....</i> | 36 |
| 3.1.2 | <i>Discussion et hypothèses concernant la précision des guides chirurgicaux dynamique :</i> | 43 |
| 3.2 | AVANTAGES ET INCONVENIENT DE LA NAVIGATION DYNAMIQUE IMPLANTAIRE | 46 |
| 3.2.1 | <i>Le temps.....</i> | 46 |
| 3.2.2 | <i>La courbe d'apprentissage</i> | 46 |
| 3.2.3 | <i>L'ergonomie</i> | 47 |
| 3.2.4 | <i>Flexibilité dans le plan de traitement.....</i> | 47 |
| 3.2.5 | <i>Coût :.....</i> | 47 |
| 3.2.6 | <i>Le patient</i> | 48 |
| 3.2.7 | <i>Stabilité et reproductibilité</i> | 49 |
| 3.2.8 | <i>Résumé avantages +/-inconvénients - :</i> | 50 |
| 3.3 | INDICATION DE LA NAVIGATION DYNAMIQUE..... | 52 |
| 4 | CONCLUSION | 53 |

| | | |
|----------|----------------------------|-----------|
| 5 | ANNEXES | 54 |
| 5.1 | ETUDES | 54 |
| 5.2 | BIBLIOGRAPHIE | 71 |
| 5.3 | REGISTRE DES TABLEAUX..... | 75 |
| 5.4 | TABLE DES FIGURES..... | 76 |

1 Introduction

En septembre 2017 une université et un service hospitalier de stomatologie militaire en Chine(1)(Xi'an, province du Shaanxi) ont posé sans intervention per-opératoire humaine, les deux premiers implants sur un patient vivant, grâce à la programmation de Yomi, un dispositif robotique actif. Cet exemple illustre les progrès de la pratique implantaire. Au-delà de cette première scientifique, la démocratisation de l'implantologie dans les cabinets dentaires se développe : 450 000 implants sont posés dans le monde chaque année(2) ,dont près de 40 000 en France, avec un taux de succès rapportés dans la presse spécialisée de 95%(2).

Depuis les années 1970 et les travaux de Bränemark, les pratiques ont progressé en s'appuyant sur les différentes découvertes et en utilisant les nouveaux outils mis à la disposition des chirurgiens.

Ainsi la **Navigation implantaire** a vu le jour il y a quelques années, mais les méthodologies traditionnelles s'appuyant sur les guides radiologiques et les guides chirurgicaux sans l'aide poussée de la numérisation se révèlent aujourd'hui imparfaits pour la précision des axes implantaires. Du projet prothétique qui s'adapte aux implants, la discipline est passée de l'implant au service de la prothèse : le concept du "**prosthétic driven implantology**" : Implantologie guidée par la prothèse.

L'implantologie moderne repose donc sur le principe que la position idéale de l'implant doit être guidée par le projet prothétique et la planification.

Comment déterminer finement cette position et une fois déterminée, comment s'assurer que le geste chirurgical sera conforme ?

Une solution est proposée par la **chirurgie numérique guidée**

Après l'**orthopantomogramme** et la **rétro-alvéolaire** les cabinets dentaires se sont dotés de la tomodynamométrie et du **CBCT (Cône Beam Computed Tomography)**, ouvrant la voie à une meilleure appréhension et préparation de la chirurgie et de la future prothèse.

Le "**boom**" **informatique**, le traitement plus rapide des données, l'imagerie 3D, les multiples logiciels de planifications implantaires, offrent désormais une visualisation instantanée et en trois dimensions aux praticiens.

Grace à la planification numérique, ces derniers sont en mesure de virtuellement dessiner la future réhabilitation, liant ainsi projet prothétique et l'environnement anatomique.

De la position optimale virtuelle de l'implant à la réalisation chirurgicale implantaire, la main humaine ne permet pas une reproduction à l'identique.

Là encore ***l'IAO*** apporte la réponse avec la réalisation des guides chirurgicaux créés par les techniques numériques sécurisant davantage le geste chirurgical.

Trois systèmes ont émergé pour palier à cette difficulté :

1. ***La robotique active dite encore « système-actif »***, où l'homme n'intervient que lors de la programmation.
2. ***Le "système semi-actif"***, appelé aussi guide stéréolithographique ou navigation statique. Le principe est de créer un guide métallique ou en résine, adapté précisément à l'arcade à planter. Il est percé de trous dans lesquels sont placés des tubes métalliques appelés « tubes gigognes ». Il permet le guidage précis du geste chirurgical.
3. ***La robotique passive, appelée "système passif" ou "navigation dynamique" ou encore "image guided navigational implantology"***. Comme son nom l'indique, le chirurgien dispose d'une assistance visuelle lors de son geste opératoire.

Ce travail consistera au rappel des ***généralités en implantologie*** puis à l'évaluation de ***l'intérêt clinique de la navigation implantaire dynamique*** à travers trois points :

-sa précision

-ses avantages et inconvénients

-ses indications

2 Généralités en implantologie

La démarche médicale pour établir un plan de traitement en implantologie obéit aux règles habituelles fixées en dentisterie :

De l'examen initial, où le patient reçoit une information claire et loyale, à la mise en œuvre de la thérapeutique choisie, la séquence suivante peut être suivie :

Examen initial

Examen clinique

Recherche des objectifs

Recherches des éventuels facteurs de risques

Examens complémentaires

Mise en place du plan de traitement

2.1 Evaluer les facteurs de risques

Un **outil** est proposé aux chirurgiens-dentistes pour évaluer les facteurs de risques et la difficulté du cas implantaire auxquels ils sont confrontés :

La classification SAC, pour Simples, Avancés et Complexes(3)

Cette classification permet d'appréhender la complexité du plan de traitement et d'anticiper les futures problématiques de celui-ci. Les facteurs de risques esthétiques, anatomiques et environnementaux, ainsi que des facteurs de risques liés à la restauration prothétique y sont présentés et classés en trois niveaux de risques : Faible, Moyen et Elevé.

2.1.1 Facteurs de risques Esthétiques

| Facteur de risque esthétique | Niveau de risque | | |
|---|---|--|--|
| | Faible | Moyen | Elevé |
| Etat médical | Patient en bonne santé, coopératif avec un système immunitaire intact | | Déficit immunitaire |
| Tabagisme | Non fumeur | Fumeur léger (< 10 cigarettes / jour) | Gros fumeur (> 10 cigarettes / jour) |
| Demande esthétique du patient | Modérée | Moyenne | Elevée |
| Ligne du sourire | Basse | Moyenne | Haute |
| Biotype gingival | Peu festonné, épais | Moyennement festonné, épaisseur moyenne | Très festonné |
| Forme des couronnes | Rectangulaire | | Triangulaire |
| Infection sur le site de l'implant | Non | Chronique | Aigüe |
| Niveau d'os autour des dents adjacentes | ≤ 5 mm par rapport au point de contact | 5,5 à 6,5 mm par rapport au point de contact | ≥ 7 mm par rapport au point de contact |
| Etat de restauration des dents voisines | Vierges | | Restaurées |
| Largeur de l'espace édenté | 1 dent (≥ 7 mm) | 1 dent (≤ 7 mm) | 2 dents ou plus |
| Anatomie des parties molles | Tissus mous intacts | | Défauts des tissus mous |
| Anatomie osseuse de la crête alvéolaire | Crête alvéolaire sans déficit osseux | Déficit osseux horizontal | Déficit osseux vertical |

Tableau 1: Facteurs de risques Esthétiques

Un patient fumeur, avec une ligne du sourire haute (sourire gingival), un biotype gingival fin et un édentement supérieur à deux dents, présentera un niveau de risque concernant l'esthétisme, supérieur, à un patient non fumeur, avec une ligne du sourire basse, un biotype épais et peu festonné et un édentement unitaire.

2.1.2 Environnement Anatomique et fonctionnel

| Problème | Notes | Degré de difficulté | | |
|---|--|---|---|---|
| | | Faible | Moyen | Elevé |
| Environnement oral | | | | |
| Santé bucco-dentaire générale | | Pas de maladie active | | Maladie active |
| Etat de dents adjacentes | | Dents restaurées | | Dents saines |
| Raison de la perte des dents | | Carie/traumatisme | | Parodontopathie/Parafonction occlusale |
| Occlusion | | | | |
| Schéma d'occlusion | | Guidage antérieur | | Pas de guidage |
| Engagement dans l'occlusion | | Engagement minime | | Engagement de la prothèse sur implant dans l'occlusion |
| Parafonction occlusale | Risque de complication affectant la restauration mais pas la survie de l'implant | Absent | | Présente |
| Relation maxillo-mandibulaire | Désigne le recouvrement vertical et horizontal et son effet sur les possibilités de restauration et le résultat esthétique | Classe d'angle I et III | Classe d'angle II div 1 et 2 | Restauration impossible sans traitement préparatoire adjuvant en raison d'une malocclusion sévère |
| Espace mésio-distal (dents centrales maxillaires) | La symétrie est indispensable à la réussite du traitement | | Symétrie +/- 1mm par rapport à la dent controlatérale | Asymétrie dépassant 1 mm |
| Espace mésio-distal (dents latérales maxillaires) | | Symétrie +/- 1mm par rapport à la dent controlatérale | Asymétrie dépassant 1 mm | |

Tableau 2: Facteurs de risque anatomique et fonctionnel

Une maladie parodontale non traitée, des para-fonctions occlusales, une absence de fonctions canine ou groupe, sont autant de situations cliniques où le risque d'échec implantaire est élevé.

L'étiologie de la perte de l'organe dentaire est aussi à considérer : une situation de perte suite à un trauma est préférable à une situation de perte faisant suite à une infection.

2.1.3 Autres

| Problème | Notes | Degré de difficulté | | |
|--|--|---|--|--|
| | | Faible | Moyen | Elevé |
| Provisoires | | | | |
| Pendant la cicatrisation des implants | | Aucune provisoire nécessaire | Amovible | Fixe |
| Provisoires sur les implants nécessaires | Provisoires nécessaires pour développer les zones esthétiques et les zones de transition des tissus mous | Aucune provisoire nécessaire | Marge de la restauration < 3 mm apicalement au bord gingival | Marge de la restauration ≥ 3 mm apicalement au bord marginal |
| Autres facteurs | | | | |
| Protocole de mise en charge | | Mise en charge conventionnelle ou précoce | | Mise en charge immédiate |
| Risque esthétique | Evaluer selon ERE | Faible | Moyen | Important |
| Maintenance | Besoins probables de maintenance selon le profil du patient et le dessin de la prothèse prévue | Peu importante | Modérée | Importante |

Tableau 3: Facteurs de risque lié au protocole de mise en charge et à la prothèse provisoire

Le degré de difficulté du traitement augmente lors d'une mise en charge immédiate par rapport à une mise en charge conventionnelle.

2.2 Le projet prothétique au centre de la thérapeutique

2.2.1 Le concept « prosthétic driven implantology »

La solution implantaire peut être proposée pour tous les types d'édentements, qu'ils soient unitaires, pluraux ou totaux.

Quelque soit le cas, l'implant a un objectif de réhabilitation prothétique. C'est la future prothèse (unitaire, bridge porté ou prothèse complète) qui définit la position du ou des implants(4).

A ce titre il est important suite à l'étape de la planification et lors de la phase chirurgicale de respecter la position implantaire préalablement choisie.

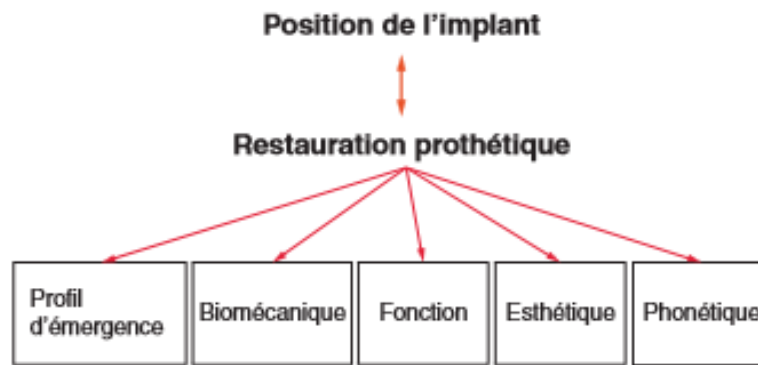


Figure 1: Relation entre projet prothétique et position de l'implant

2.2.2 L'Analyse du projet prothétique

Afin d'anticiper les risques mécaniques et esthétiques un modèle d'étude monté sur articulateur est réalisé. Des Wax-up sur les crêtes édentées permettent de reconstituer le projet, et de le valider avec le patient.

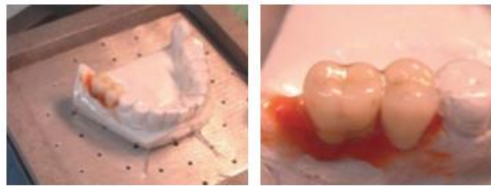


Figure 2: réalisation d'un wax-up

Un montage directeur virtuel peut être aussi envisagé. A l'aide d'une caméra optique une empreinte est réalisée et après traitement informatique, un wax up virtuel est obtenu.

La réalisation d'une prothèse provisoire lorsque la situation l'indique (édentement complet, ou antérieur) ou l'utilisation d'une prothèse déjà en place, permet de transposer en bouche les informations apportées par les cires diagnostiques.

Le patient accède ainsi à une visualisation de la future réhabilitation, et dans le cadre d'une prothèse temporaire, cela lui permet de s'habituer progressivement au volume et à l'encombrement de la restauration.

2.2.3 Le guide radiologique

2.2.3.1 Fabrication

Il correspond au duplicata du montage directeur, ou de la prothèse adjointe du patient aménagée à cet effet.

Dans le cas de wax up virtuelles, le couplage avec l'imagerie 3D peut se faire directement sans nécessiter la confection d'un guide radiologique

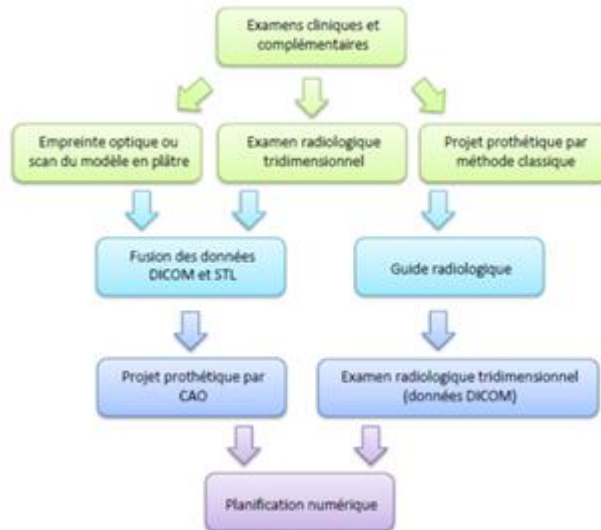


Figure 3: Les voies aboutissant à la planification numérique

2.2.3.2 Cahier des charges du guide-radio :

- être radio-opaque
- ne pas émettre de bruits parasites, responsables d'artéfacts à l'imagerie
- détermine l'enveloppe de la restauration prothétique
- détermine l'épaisseur des tissus mous
- informe sur l'axe d'émergence de/des l'implants
- être stable et rétentif

2.2.3.3 Défaut de positionnement

L'étape du guide radiologique intervient précocement dans la séquence du plan de traitement implantaire. A ce titre, une erreur de positionnement à ce stade aurait une influence sur la future position implantaire finale.

Pour éviter tout impair, dans certaines situations (édentements terminaux importants voir édentements complets) il est primordial de réaliser une clé d'occlusion.

2.3 Adéquation du projet prothétique avec les contraintes anatomiques

L'objectif prothétique défini, il doit être confronté aux possibilités qui sont données par l'environnement anatomique du patient ainsi que la qualité et le volume osseux du site à implanter. Au maxillaire et à la mandibule, on retrouve des obstacles structurels à prendre en compte lors de la chirurgie : des cavités pneumatiques comme le sinus maxillaire, des paquets vasculo-nerveux comme l'artère palatine descendante ou encore le nerf alvéolaire inférieur. De façon non exhaustive, ces éléments anatomiques, au maxillaire puis à la mandibule sont présentés dans les points suivants.

2.3.1 Obstacles maxillaires

2.3.1.1 Le sinus maxillaire

Cavité pneumatique de forme pyramidale quadrangulaire à base interne, de volume moyen de 12cm³, le sinus est tapissé d'une muqueuse respiratoire : la membrane de Schneider.

Sterile, parfois cloisonné par des travées osseuses, son rôle est de réguler la température de l'air rentrant et de refroidir la température corporelle.

Le volume du sinus maxillaire augmentera selon l'âge et l'édentement.

Il est intéressant lorsque la situation le nécessite d'exploiter ce volume pour la pose d'implant.

En implantologie, ses abords chirurgicaux les plus courants intéressent les parois antérieures et inférieures (le plancher).

La position des septas ou cloisonnements osseux, l'état de la membrane de Schneider et la présence ou non de pathologie sinusienne seront à connaître avant la chirurgie.

2.3.1.2 Canal incisif ou naso-palatin

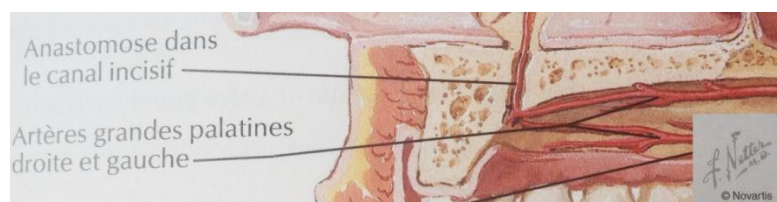


Figure 4: Vue sagittale, Sinus maxillaire, F.Netter, Elsevier Masson

Le pédicule incisif chemine le long de la suture intermaxillaire, et rejoint dans sa partie supérieure, les fosses nasales et dans sa partie inférieure, la voûte palatine : le foramen incisif.

Il est constitué du nerf naso-palatin, de l'artère et de la veine naso-palatine.

Compte-tenu de la vascularisation avec de nombreuses anastomoses et de la suppléance de rameaux nerveux postérieur dans la région, les atteintes du pédicule ont des conséquences mineures :

Une légère hémorragie pouvant être jugulée par des moyens hémostatiques locaux, et une anesthésie momentanée de la zone.

Lors d'une implantation plurale, on évite cette région, pour un édentement unitaire, on évite ce canal.

2.3.1.3 *L'artère palatine descendante*

Située dans la région ptérygo-palato-tubérositaire, l'artère palatine descendante est une branche collatérale de l'artère maxillaire. De diamètre inférieure au millimètre, elle émerge au niveau postéro-latéral du palais par le foramen grand palatin, pour vasculariser la muqueuse palatine. L'artère avec sa controlatérale, se recouvrent largement.

Le principal risque hémorragique en cas de lésion vasculaire dans la région concerne cette artère.

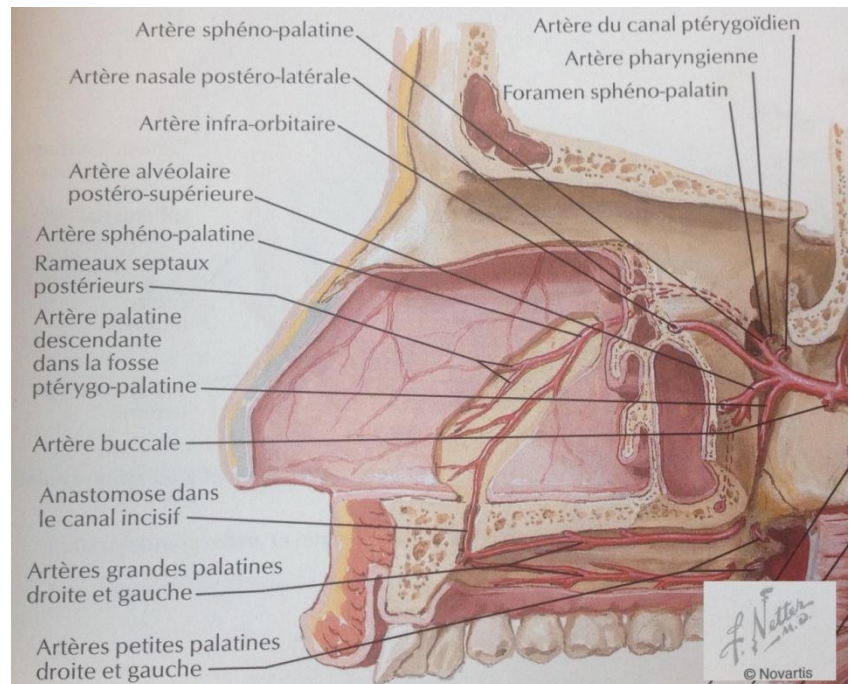


Figure 6: Coupe sagittale os maxillaire et sinus maxillaire
F. Netter, Elsevier Masson

2.3.1.4 *Le plancher des fosses nasales*

Il naît de la suture entre les deux apophyses palatines, droite et gauche, des maxillaires. En avant, se délimite un foramen osseux : l'orifice piriforme.

Ce dernier est accessible par un lambeau vestibulaire d'épaisseur totale.

Un forage en excès peut entraîner une perforation du plancher des fosses nasales. Les conséquences sont alors, une épistaxis, une inflammation de la muqueuse nasale, voir une colonisation septique péri-implantaire.

2.3.1.5 *La région zygomatique et l'implant zygomatique*

Cette région est composée de deux os : le processus zygomatique du maxillaire, et l'os zygomatique. Ils forment le plancher orbitaire.

Le zygoma forme la « pommette ». Il est traversé par le pédicule temporo-zygomatique, branche du V1 (nerf lacrymale) et du V2 (nerf maxillaire).

L'implant zygomatique est indiqué lorsque :

- l'édentement maxillaire est associé à une résorption osseuse des crêtes, avec une contre-indication de greffe osseuse.
- la topographie sinusienne est complexe
- il est associé à une pose d'implants dite conventionnelle dans le secteur antérieur.
- Une reconstruction post-traumatique ou post-tumorale est nécessaire.

Une mauvaise appréhension de l'anatomie dans la région peut aboutir, à une perforation du plancher orbitaire et une atteinte du globe oculaire, à une atteinte du pédicule temporo-zygomatique avec des troubles de vascularisation de la pommette et des troubles lacrymaux, ainsi qu'à une atteinte de la loge ptérygo-temporo-tubérositaire et le risque vasculaire associé.

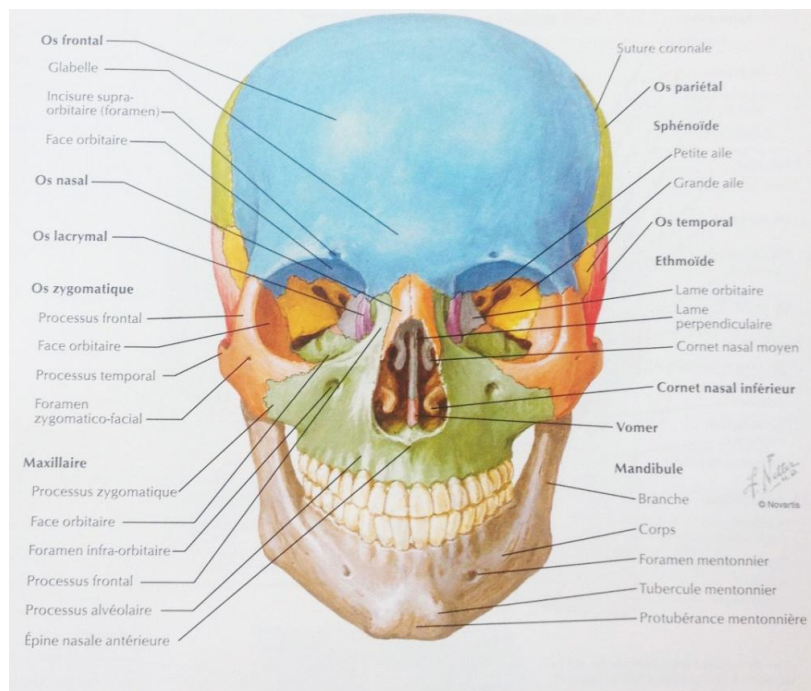


Figure 7: Vue Frontale os crânien, F.Netter, Elsevier Masson

2.3.1.6 La région ptérygo-palato-tubérositaire et l'implant

Décrit en 1975 par Linkow(5), il permet une stratégie d'évitement des sinus maxillaires. Il est positionné à travers la tubérosité maxillaire, avec un blocage apical dans le processus ptérygoïde de l'os sphénoïde. A l'instar de l'implant zygomatique, la maîtrise de l'environnement anatomique avec la proximité de l'artère maxillaire, et une reproduction fiable de la chirurgie versus la planification, sont indispensables lors de la pose d'un implant ptérygoïdien.

2.3.2 Obstacles mandibulaires

2.3.2.1 Le nerf alvéolaire inférieur (NAI) ou pédicule alvéolo-dentaire inférieur (PADI)

Le NAI (nerf alvéolaire inférieur), est issu du 3ème segment du nerf trijumeau.

En postérieur, plaqué sur le versant interne de la branche montante, il chemine d'arrière en avant et du haut vers le bas, pour entrer dans l'os spongieux de la mandibule au niveau du foramen mandibulaire. Le canal alvéolaire inférieur prend fin au niveau du foramen mentonnier.

Il donne ensuite 2 pédicules : le pédicule mentonnier et le pédicule incisif.

La 3ème branche du V est sensitive. Une atteinte par section, ou compression provoquera des hypoesthésies et/ou anesthésie, réversible ou irréversible dans la zone intéressée.

2.3.2.2 Le pédicule incisif

Le pédicule incisif intéresse l'innervation et la vascularisation du secteur incisif. D'un diamètre de 2mm à son origine, il poursuit son cheminement intra-osseux et évolue généralement sur le versant interne de la corticale basale.

2.3.2.3 Le foramen mentonnier

Le pédicule mentonnier, fait son émergence au niveau du foramen mentonnier, généralement à l'aplomb de la deuxième prémolaire mandibulaire. Cependant il présente une anatomie inconstante, avec une grande variabilité inter-patient.

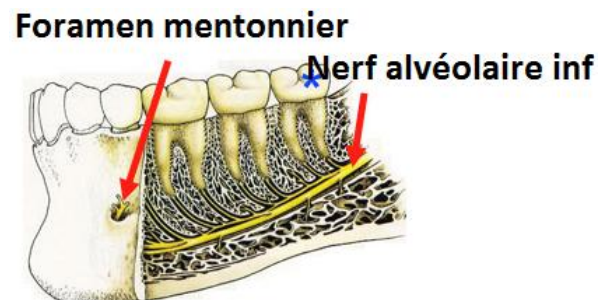


Figure 8: Coupe sagittale mandibulaire, F. Netter, Elsevier Masson

Certaines de ces structures anatomiques peuvent être explorées par l'imagerie 2D : Le volume osseux vertical de la crête alvéolaire mandibulaire peut être appréhendé avec une radio panoramique.

Une radiologie conventionnelle type « nez-front-plaque » ou incidence de Blondeau permet de bien visualiser le processus zgomatique.

Cependant, l'examen de choix en implantologie pour maîtriser cet environnement anatomique, reste l'imagerie 3D soit le scanner, soit le CBCT.

2.3.3 La qualité osseuse

L'évaluation de la qualité osseuse et du type d'os rencontré cliniquement est primordial. Une stabilité primaire, sine qua non du succès thérapeutique sera recherchée, avec l'usage d'un matériel spécifique et adapté aux tissus osseux.

En 1985 Lekholm et Zarb(6) proposent une classification permettant de répertorier les différents types osseux rencontrés :

- L'os de type I : Os compact homogène
- L'os de type II : Os cortical épais autour d'un os spongieux à trabéculations denses
- L'os de type III : Os spongieux à trabéculations denses avec une corticale fine
- L'os de type IV : Os spongieux en quasi-totalité, os cortical presque inexistant

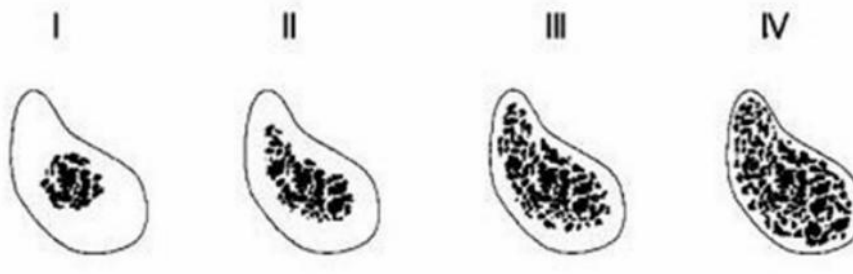


Figure 9: Classification de Lekholm et Zarb

Le taux de succès implantaire n'est pas le même selon le type osseux retrouvé :

L'os de type I présente un meilleur avantage concernant la stabilité primaire de l'implant. Cependant des contraintes excessives lors du forage, provoquant une hausse de la température autour du site osseux implanté, au-delà de 47°C (7), peuvent entraîner une nécrose péri-implantaire.

A l'inverse l'os de type IV, la densité osseuse faible, présente le désavantage de ne pas garantir une bonne stabilité implantaire le jour de la pose. Dans ce type de cas, la forme de l'implant utilisé, son diamètre et son état de surface sont choisis de manière à diminuer le risque d'échec. Ainsi un implant large avec un état de surface rugueux est préféré. Par ailleurs on sous dimensionne le diamètre des puits implantaire. La préparation de l'os et le choix de l'implant améliorent la stabilité primaire de celui-ci.

La densité osseuse est appréciée grâce à la l'imagerie 3D. Grâce au scanner ou CBCT, une image numérisée est obtenue. Chaque pixel équivaut à une densité, mesurée en Hounsfield. L'unité correspond à des densités qui dans l'ensemble de l'organisme s'étendent sur 2000 valeurs. Par définition le 0 correspondent à l'eau pure, - 1000 à l'air pur, et + 1000 au métal et à l'os compact.

On estime qu'une stabilité primaire peut être obtenue plus facilement à partir d'une valeur 500 Hounsfield.

| SUBSTANCE | HU |
|----------------------|-------|
| Air | -1000 |
| Graisse | -120 |
| Eau | 0 |
| Muscle | +40 |
| Produit de contraste | +130 |
| Os | >400 |

Tableau 4: Densité, Hounsfield et Tissus

Le diagnostic osseux obtenu grâce à l'imagerie doit de façon systématique, être réévalué cliniquement en per-opératoire par le chirurgien.

2.3.4 Définition du succès implantaire

L'adéquation du projet prothétique et de l'environnement anatomique du patient est déterminant quant à la pérennité de l'implant dentaire : c'est la notion de succès implantaire. Il est défini en 1986, par *Albrektsson et Coll*(8). Les auteurs proposent 5 conditions au succès implantaire :

- Un implant cliniquement sans mobilité
- Une absence de radio-clarté péri-implantaire
- Une perte osseuse verticale inférieure à 0,2 mm, un an après la pose
- L'implant ainsi que la zone implantée ne présente aucune symptomatologie persistante et/ou irréversible
- Le taux doit être à cinq ans, supérieur à 85% et à 10 ans, supérieur à 80%

2.4 Technique d'imagerie

L'orthopantomogramme ou radio-panoramique est resté durant des années, l'examen d'imagerie de choix en implantologie. Elle présente cependant les défauts de représenter une image avec des distorsions et dans laquelle l'appréciation du volume osseux vestibulo-lingual ou vestibulo-palatin est impossible. Par ailleurs l'IAO, Implantologie Assistée par Ordinateur, implique l'exploitation d'images numériques en trois dimensions, uniquement obtenues avec un CT-scan (scanner) ou un CBCT.

2.4.1 Le scanner

Appelé scanner ou **tomodensitométrie axiale**, il est un examen privilégié pour examiner les tissus durs. Cette technique d'imagerie sectionnelle, repose sur l'absorption différentielle des rayons X par les différents volumes traversés. De multiples rotations d'un faisceau mince de rayons X, permettent d'obtenir des coupes se superposant les unes aux autres. Après une conversion numérique des coupes obtenues lors de l'acquisition, le logiciel de planification reconstruit les volumes tissulaires dans les trois dimensions de l'espace.

2.4.2 Le CBCT : Cone Beam Computed Tomography

Le CBCT ou **Imagerie volumique par faisceau conique**, est une technique de tomodensitométrie. Elle se distingue du scanner traditionnel par son faisceau de rayons X émis, de forme conique. Une seule rotation est effectuée, allant de 180° à 360°, permettant d'acquérir des données numériques dans les différents plans de l'espace. Ces données sont ensuite transmises à un ordinateur pour reconstruction volumique.

2.4.3 Le Choix dans la thérapeutique implantaire

La qualité de l'image numérisée, qu'elle soit obtenue après scanner ou CBCT, dépend de 4 paramètres fondamentaux(9) :

- la résolution spatiale, capacité à discriminer les petites structures
- le contraste, capacité à distinguer les différences de contrastes
- le bruit, correspondant à la variabilité des valeurs de Voxel dans une même image
- les artéfacts, région où l'image est aberrante

Le **scan CT** présente un coût supérieur, une dosimétrie plus importante, une faible disponibilité, un encombrement plus grand et un temps d'acquisition plus long par rapport au **CBCT**(9–12). **Ce dernier est donc majoritairement utilisé en radiologie pré-implantaire.**

Il présente néanmoins le désavantage lié à sa géométrie de projection en faisceau conique, à la sensibilité du détecteur et à la résolution, d'obtenir des images sensibles aux artéfacts et aux bruits, avec un mauvais contraste des tissus mous.

Un rapport de la HAS en 2009(11) rapporte les conclusions suivantes :

« bien que la qualité de l'image soit difficile à définir et quantifier et que son estimation reste subjective, les études soulignent que le CBCT a une résolution spatiale et une fiabilité qui semble comparable au scanner pour explorer des structures denses tel l'os ou les dents et pour permettre d'identifier des fractures, kystes ou lésions osseuses, corps étrangers, à l'intérieur de son champ de vue. Il ne permet pas par contre la mesure réelle des densités des parties molles.

La variation des paramètres entraîne des différences significatives dans la qualité de l'image. Il est donc important de pouvoir sélectionner différents paramètres sur un même appareil, aussi raisonnablement bas que possible, afin de minimiser la dose délivrée au patient tout en ayant une qualité d'image suffisante pour l'application sélectionnée [...] les études comparant les mesures « réelles » avec les mesures obtenues avec le CBCT ont montré que la précision et la fiabilité de ce dernier étaient suffisantes pour recourir à son utilisation en orthodontie, chirurgie maxillofaciale et implantaire »

Par ailleurs, un rapport de la commission européenne en 2012, donne les mesures de doses effectives suivantes, selon le type d'imagerie exploitée :

| Opnametechniek | Effectieve dosis (µSv) | Referenties |
|--------------------------------|----------------------------------|--|
| Intraorale opname | < 1,5 (rechthoekige veldgrootte) | Ludlow et al, 2008 |
| Panoramische röntgenopname | 2,7 - 24,3 | Ludlow et al, 2008 Okano et al, 2009 Garcia Silva et al, 2008a Garcia Silva et al, 2008b Palomo et al, 2008 |
| Cephalometrische röntgenopname | < 6 | Ludlow et al, 2008 |
| CBCT, FOV < 10 cm | 11-674 (mediaan 61) | Ludlow et al, 2003 Ludlow en Ivanovic, 2008 Lofthag-Hansen et al, 2008 Hirsch et al, 2008 Okano et al, 2009 Loubele et al, 2009 Roberts et al, 2009 Suomalainen et al, 2009 Qu et al, 2010 Pauwels et al, 2012 |
| CBCT, FOV >10 cm | 30-1073 (median 87) | Ludlow et al, 2003 Tsiklakis et al, 2005 Ludlow et al, 2006 Ludlow en Ivanovic, 2008 Garcia Silva et al, 2008a Okano et al, 2009 Faccioli et al, 2009 Loubele et al, 2009 Roberts et al, 2009 Pauwels et al, 2012 |
| Multislice CT (MSCT) | 280-1410 | Okano et al, 2009 Garcia Silva et al, 2008a Loubele et al, 2009 Faccioli et al, 2009 Suomalainen et al, 2009 |

Tableau 5: Dose effective en fonction du type d'imagerie, HAS 2102

2.5 Les systèmes de navigation implantaire

2.5.1 Implantologie assistée par ordinateur (IAO): Le « Flux Numérique » et le « Digital Patient »

2.5.1.1 Définition

L'IAO met l'informatique au cœur du traitement implantaire. Il permet **la planification de l'acte, la chirurgie guidée** et la possibilité d'une **confection en amont de la chirurgie de la future prothèse**.

Le « digital patient » est la numérisation des données du patient : les photos (Jpeg), l'imagerie 3D (DICOM), la prise d'empreinte avec une caméra optique ou à l'aide d'un scan (STL).

Le flux numérique est un ensemble d'outils de la chaîne informatique et numérique, à la fois du cabinet et du laboratoire : empreinte optique, logiciel de planification, CBCT, guides chirurgicaux, interface d'échange entre le laboratoire de prothèse et le cabinet dentaire, imprimante 3D, usinage de provisoires en CFAO.

Ce flux numérique est aujourd'hui, à quelques exceptions près, ouvert. Dans la séquence de traitement on peut entrer et sortir à l'endroit où on le souhaite.

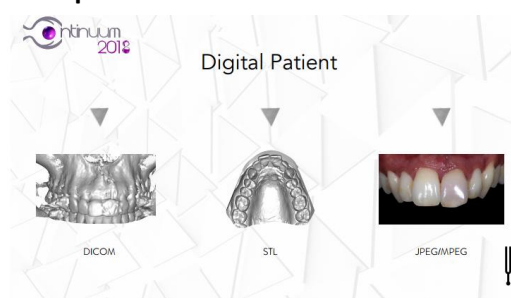


Figure 10: Continuum 2018, Dr R.Noharet

2.5.1.2 Indications

La planification implantaire :

Cette étape nécessite le recueil de l'ensemble des données du patient. Suite à l'imagerie 3D, et à l'aide de logiciels de planifications, le projet implantaire et prothétique est dessiné.

La chirurgie guidée :

Lors de l'acte chirurgical une assistance au guidage peut être utilisée par l'opérateur. Deux systèmes sont disponibles, le guide chirurgical statique et la navigation dynamique.

La confection de la prothèse

L'IAO va permettre :

- La réalisation des prothèses provisoires ou d'usage avant la pose des implants.
- le travail du profil d'émergence des futures restaurations, et d'obtenir un bio-mimétisme.
- Dans le cadre d'une réhabilitation antérieure, une mise en charge immédiate esthétique.

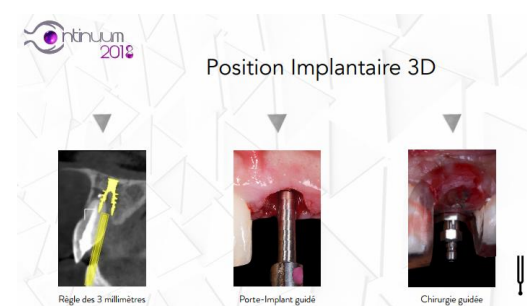


Figure 11: Continuum 2018, Dr R.Noharet



Figure 12, Continuum 2018, D R.Noharet

2.5.2 La navigation mentale (13)

Elle est aussi appelée « Free hand » ou pose manuelle des implants. Elle consiste en une chirurgie sans système de guidage. C'est donc l'expérience de l'opérateur et sa main qui déterminent la position de l'implant. Des points de repères anatomiques remarquables ainsi que les mesures prises au préalable, sont nécessaires pour orienter le forage. Dans la plupart des situations cliniques la méthode implique la vision intégrale du site opératoire, avec un caractère invasif supérieur par rapport à la chirurgie guidée.

2.5.3 La navigation active

La navigation active est aussi nommée robotique active. L'acte chirurgical est réalisé par le robot.

Le rôle de l'opérateur consiste en la planification, la programmation et le contrôle du bon déroulement de l'intervention.

Développée par une société américaine (YOMI, NEOCIS inc), la première chirurgie implantaire du genre, a eu lieu en septembre 2017.(1)

2.5.4 La navigation statique ou robotique semi-active : les guides chirurgicaux(12,13)

Les guides chirurgicaux permettent de transposer la planification réalisée à la situation clinique intra-orale. Ils déterminent la position idéale du point d'émergence de l'implant à travers la corticale osseuse et la muqueuse. Ils guident la main de l'opérateur selon l'axe implantaire idéal.

Il existe différents guides chirurgicaux classés selon leurs types d'appuis :

Les guides chirurgicaux à appuis muqueux, dentaires et osseux.

Initialement issus des guides radiologiques, avec l'apport de l'IAO les procédés de fabrications ont évolué :

- **La méthode additive** ou guide stéréolithographique, dite de prototypage rapide. Le principe est de polymériser couche par couche une résine photosensible liquide avec un faisceau laser. L'épaisseur d'une couche peut varier entre 0,07mm et 0,75mm. A la fin de la conception des tubes appelés « canons » seront ajoutés. Ils permettront le guidage des forets.
- **la méthode soustractive** ou encore appelée mécanique. Elle consiste en la transformation d'un guide radiologique, muni d'un repère spatial radio-opaque, en guide chirurgical (EasyGuide, Keystone Dental).

La précision de guides statiques varie selon leur mode de fabrication et le type d'appuis.

2.5.5 La navigation dynamique

La **Navigation dynamique** est aussi appelée robotique passive ou encore « image guided implantology ». A l'image de la radio-interventionnelle, cependant sans irradiation continue du patient, l'opérateur s'aide de l'imagerie pour guider son geste. Un parallèle peut être fait entre la navigation dynamique et le GPS(Global position system ou système de localisation mondial)(14).

2.6 La navigation chirurgicale dynamique ou robotique passive ou encore IGI (image guided implantology)

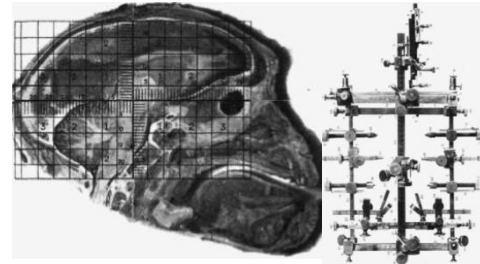
2.6.1 Historique

Depuis les travaux de Wilhelm Roatengen en 1895 avec la découverte des Rayons X, l'outil radiologique médical n'a cessé d'évoluer.

Le guidage per-opératoire est décrit pour la première fois en 1908 : Horsley et Clarke(15) explorent l'anatomie et les fonctions cérébrales de macaques Rhésus à l'aide d'imagerie et de cadres stéréotaxiques.

Godfrey Newbold Hounsfield en 1979 reçoit le prix Nobel de médecine après avoir développé une méthode d'acquisition dans les 3 dimensions : la tomographie axiale ou Computerized Tomography (CT). En parallèle le progrès informatique permet de développer des logiciels de planification et de navigation utilisant l'imagerie 3D. Ainsi en 1992 la première intervention neurochirurgicale avec un dispositif de navigation dynamique voit le jour : le système « Viewing Wand »(16). Lorsque les indications le permettent, le système supplée à la radiologie interventionnelle et aux cadres stéréotaxiques, plus irradiants et nécessitant l'immobilisme complet du patient.

Le dispositif se démocratise, et est utilisé en orthopédie, ORL, et en maxillo-faciale pour devenir usuel dans ces disciplines au début des années 2000.(16,17)



2D

En Odontologie, dès 1990, des logiciels de planifications implantaire voient le jour. Les compagnies développent alors leur propre logiciel/Guides chirurgicaux statiques.

Dix années plus tard les 1ers systèmes de navigations entrent sur le marché.

Onéreuse, et difficile à mettre en place, nécessitant des moyens numériques et d'imagerie volumique, il faudra attendre l'essor du CBCT dans les cabinets libéraux en combinaison avec des logiciels de planification pour que la navigation dynamique chirurgicale se développe.(16)

2.6.2 Principe

La navigation chirurgicale dynamique ou robotique passive repose sur une technologie de type « motion tracking », c'est-à-dire de détection des mouvements.

Le dispositif permet à l'opérateur une localisation spatiale de ses instruments.

En chirurgie guidée implantaire (IGI), plusieurs systèmes de navigations dynamiques ont été exploités :

- un système optoélectronique ou traceur optique.
- un système de traçage électromagnétique
- un système ultrasonore

Les systèmes les plus aboutis aujourd'hui utilisent tous le principe de traceurs optiques (16–18). En effet, des interférences électromagnétiques liées aux équipements électroniques et des variations de température ambiante avec des courants d'airs, rendent respectivement, les systèmes basés sur l'électromagnétisme et les ondes ultra-sonores peu fiables.

Dans la littérature nous trouvons cependant des recherches sur la détection de mouvement par électromagnétisme qui tendent à montrer une performance comparable à une technologie optoélectronique, avec l'avantage de ne pas être sensible aux obstacles physiques.(19)

Des marqueurs sont solidarisés à l'arcade dentaire du patient et à la pièce à main ou contre-angle de l'opérateur. Leurs mouvements sont alors suivis en temps réel à l'aide d'une caméra infra rouge selon le principe d'une triangulation. La position respective du patient et son anatomie versus le foret est connue et retranscrite en continue sur un écran. Une large majorité des systèmes sur le marché utilise une cible et un code couleur pour renseigner le chirurgien sur le point d'émergence ou centrage, l'angulation et la profondeur verticale.(13,20)

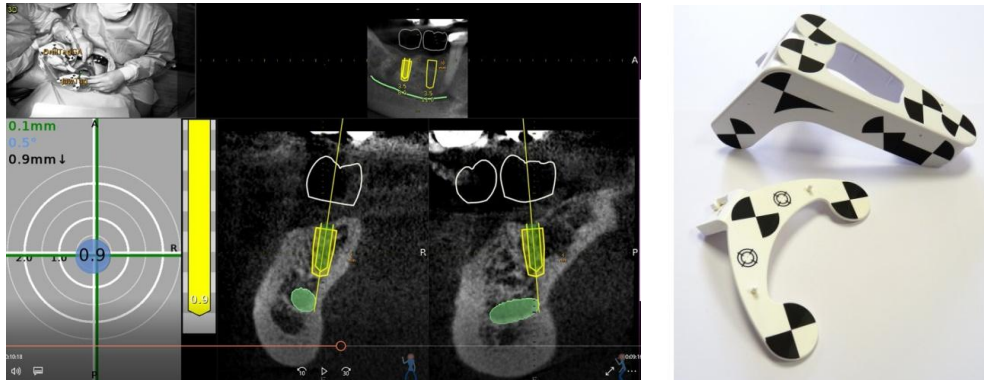


Figure 13: Ergonomie de l'interface et marqueurs, système Navident

2.6.3 Les systèmes existants

Les systèmes décrits dans la littérature, dédiés à l'implantologie font appel à une technologie de traceurs optiques ou IR-LED (infrared light emitting diode). Des systèmes provenant d'autres disciplines médicales peuvent être adaptés à la chirurgie orale.(21,22)

Un système de navigation dynamique rassemble : une unité centrale avec une interface , une ou des caméras infrarouges permettant l'acquisition dans les trois dimensions, une pièce à main munie d'un ou plusieurs repères « caméras sensibles » et une gouttière se fixant en bouche avec les mêmes repères.(4)

Ceci est une liste non exhaustive des systèmes sur le marché à ce jour.

- **Robodent**(20,23)
- **Vector Vision2** (24)
- **IGI denX** (23,25)
- **Navident (claronav)**(26)
- **X nav Navtech** (27)
- **VISIT** (28)
- **Artma Virtual Patient** (29)

2.6.4 Protocoles(14,20):

Bien que l'ergonomie des différents systèmes de robotiques passives puisse changer selon les développeurs, la technologie utilisée repose sur les mêmes principes : un traçage optique infrarouge. Ainsi le protocole présenté ci-dessous n'est pas propre à un système en particulier mais reprend les étapes communes dans la séquence de soins, des dispositifs existant sur le marché.

1. Le diagnostic clinique

L'implantologie est une discipline transdisciplinaire, dans lequel le projet prothétique définit les modalités du traitement chirurgical à venir.

La première étape consiste après examen clinique et radiologique de première intention, à prendre des empreintes, faire un montage sur articulateur et réaliser un wax-up ou un montage directeur.

2. Réalisation du guide radiologique et solidarisation avec l'arc de navigation

Suite à l'analyse occluso-prothétique et la réalisation des wax-up, une gouttière radiologique ou guide radio est conçue. Elle prend appui sur les dents résiduelles ou sur la muqueuse (lors d'édentations totales) et est munie dans le secteur édenté de dents radio opaques, répliques du projet initial.

Un arc de navigation, ou une gouttière de navigation est solidarisé par clippage ou thermocollage au guide radiologique. Le dispositif est muni d'index ou cibles, permettant d'une part la localisation spatiale de la cavité buccale du patient, et d'autre part de mettre en rapport les positions de l'instrument, du « tracker-optique », et du site opératoire.

3. Examen radiologique

Lors de l'examen tridimensionnel le patient est muni de la gouttière de navigation. Il est primordial de s'assurer de la bonne stabilité et de la mise en place reproductible de celle-ci.

Les données obtenues au format DICOM sont alors importées dans le logiciel de planification/navigation.

4. Planification

La planification d'une chirurgie assistée par guidage dynamique ne diffère pas d'une planification conventionnelle.

Les repères, index, ou cibles identifiés, le chirurgien trace la courbe de Bézier pour générer une vue panoramique, axiale, sagittale, frontale et 3D du patient.

L'opérateur peut alors déterminer les obstacles anatomiques et appréhender les difficultés liées à ceux-ci.

Il positionne ses implants, conformément au projet souhaité initialement et aux règles d'implantologie (distance inter-implant, distance dent-implant, distance implant-NAI), en conjuguant avec l'anatomie environnante.

5. Préparation instrumentation et étalonnage

Selon l'organisation du cabinet dentaire, la préparation de la chirurgie peut se faire dans la foulée de l'examen radiologique et de la planification ou bien être programmée quelques jours ou semaines après. Il est à noter qu'aucun changement dans la bouche du patient (mise en place de nouvelles prothèses conjointes) ne devra être fait dans la seconde situation. En effet la mise en place de la gouttière de navigation doit être reproductible avec une position identique à celle qu'elle avait lors de la planification.

-La préparation de la gouttière de navigation (arc de navigation, Navistent...):
Le site à implanter est masqué par la gouttière de navigation. Il faut donc créer une fenêtre dans celle-ci (édentement encastré) ou la couper (édentement distaux) pour ménager un accès au site opératoire. Cette modification de la gouttière de navigation ne doit pas altérer sa stabilité au risque de créer des erreurs.

Sur la gouttière est alors clipper ou visser les « trackers » optiques, ou récepteurs réfléchissants (cibles, damiers, billes céramiques...)

-la préparation du contre-angle :

A l'instar de la gouttière, des « trackers » identiques sont placés sur le manche du contre-angle.



Figure 14: Les marqueurs optiques ou "Trackers", système Navident

-La préparation de la caméra :

Celle-ci ne doit pas être trop éloignée des trackers optiques, tout en ne gênant pas l'opérateur et son équipe. Tout élément physique passant entre les récepteurs réfléchissants et la caméra entraînera une perte du signal.

Lorsque le dispositif est installé l'étalonnage du système est nécessaire. Un affichage ou un signal sonore permet de valider le bon fonctionnement de la triangulation.

Un message demande alors de vérifier la bonne calibration du dispositif : selon les différentes marques des systèmes de navigation dynamique, il est alors demandé de positionner le premier foret sur les dents adjacentes au site à implanter et/ou sur une dépression présente sur l'arc de navigation. Ce calibrage peut prendre quelques secondes.

L'étape de la chirurgie implantaire peut débuter.

6. Etape chirurgicale

Dans la plupart des systèmes proposés à ce jour, l'affichage visuel présente des similitudes : Une cible avec des cercles concentriques espacés de 0,5mm, une jauge de profondeur, ainsi que l'image radiologique des trois dimensions (axiale, sagittale et frontale) du site intéressé.

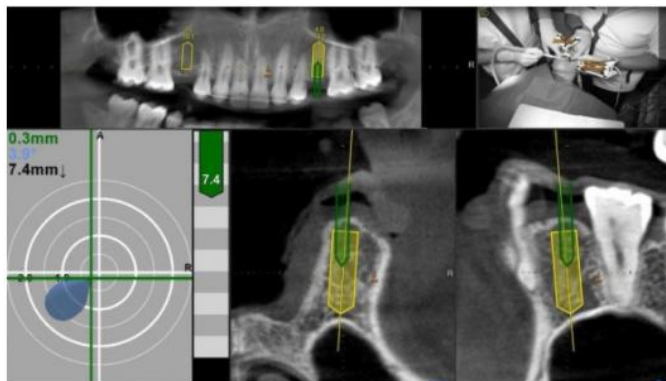


Figure 15: Ecran de Navigation , système Navident

Le cœur de cible représente le centrage de l'instrument, la jauge indique la profondeur maximale à ne pas dépasser ainsi que le bon axe à respecter.

Un code couleur, vert pour « idéal », jaune pour « convenable », rouge pour « à corriger », est utilisé en temps réel pour suivre et maîtriser la progression de l'instrument.

A chaque changement de forets, pointeurs, il est nécessaire de calibrer de nouveau selon la façon précédemment évoquée.

Le pointage, forage et la mise en place de l'implant suivent les mêmes protocoles.

3 Revue de la littérature

La navigation dynamique en implantologie est une technologie récente et la littérature sur le sujet est relativement restreinte. Le choix des articles s'est fait avec des critères d'inclusions larges :

Les bases de données exploitées ont été : **Pub Med, ScienceDirect**, des **revues spécialisées** : « international journal of computerized Dentistry » et « journal of oral and maxillofacial surgery », ainsi que des sources sur des **travaux universitaires** (Université de HongKong, Université de Toulouse).

La recherche s'est faite en Anglais et en Français, sans restriction au niveau des dates, et sur des supports écrits, vidéos ou après retranscription orale.

L'utilisation de mots clés (En anglais et en Français) « *image guided, dynamic navigation, implantology guided, surgery guided, dental implants, accuracy, real-time navigation* » ou encore « *computer assisted* », a permis de délimiter la recherche.

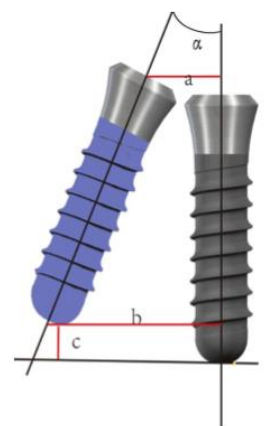
Ont été retenues les références présentant les critères suivants :

- étude in vitro comme in vivo
- « *case report* » ou cas/témoin, comparatives, descriptives
- avec des implants posés en « *full guided* » ou « *partially guided* »,
- avec des Implants « traditionnels » et zygomatiques
- dont les mesures ont été effectuées uniquement après forage « *socket* », après pose de l'implant ou suite à ces deux étapes
- par des moyens que sont le laser, le compas, des « *jigs* » ou l'imagerie 3D.

3.1 Précision de la navigation dynamique

Concernant l'évaluation de la précision de la navigation dynamique implantaire, 16 articles ont été sélectionnés selon les critères plus spécifiques que ceux précédemment énoncés. La recherche s'est effectuée sur PubMed uniquement, par mots clés. Puis une lecture des abstracts a été réalisée, aboutissant ou non à la lecture complète des articles. Le but de ces travaux devait être l'évaluation chiffrée, de la précision du guidage dynamique lors de la pose d'implant. Cette évaluation se fait par superposition du projet implantaire ou planification aux résultats finaux (après forage et/ou pose d'implant). Les résultats affichés dans ces études devaient présenter au moins une des valeurs suivantes :

- a** : La déviation ou erreur par rapport à la planification au niveau du col implantaire, ou du point d'entrée
- b**: La déviation ou erreur par rapport à la planification au niveau de l'apex ou de la partie distale du forage
- c**: la différence de profondeur par rapport à la planification
- **α** : La déviation angulaire par rapport à l'axe souhaité



Ont été écartés les études et articles où le système de navigation dynamique utilise une technologie autre qu'optoélectronique, et ce pour des raisons de fiabilité préalablement décrites. Par ailleurs les articles traitant de l'utilisation d'un guidage par l'image pour la pose d'implants zygomatiques n'ont pas été retenus : la longueur de l'implant et le contexte anatomique complexe ne correspondent pas à une activité implantaire classique de cabinet dentaire.

La gradation de l'évidence scientifique s'appuie sur trois éléments (rapport HAS 2013):

- L'existence de données dans la littérature
- le niveau de preuve des études disponibles
- la cohérence des résultats

Pour une question donnée, il est possible de classer les études selon un niveau de preuve. Il existe 3 niveaux de preuves :

| Grade des recommandations | Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature |
|---|--|
| A Preuve scientifique établie | Niveau 1 - essais comparatifs randomisés de forte puissance ; - méta-analyse d'essais comparatifs randomisés ; - analyse de décision fondée sur des études bien menées. |
| B Présomption scientifique | Niveau 2 - essais comparatifs randomisés de faible puissance ; - études comparatives non randomisées bien menées ; - études de cohortes. |
| C Faible niveau de preuve scientifique | Niveau 3 - études cas-témoins. |
| | Niveau 4 - études comparatives comportant des biais importants ; - études rétrospectives ; - séries de cas ; - études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale). |

Tableau 6: Niveau de preuve

Pour chacun de ces 16 articles nous tenteront d'identifier les biais et la puissance des études menées.

3.1.1 Tableaux :

L'analyse des articles sélectionnés est détaillée dans les annexes sous la forme suivante :

1. Titre
2. Auteurs
3. Année de publication
4. Mots clés PubMed
5. Type d'étude
6. Nombre de patients ou de modèles
7. Nombre d'opérateurs
8. Type d'édentement
9. Nombre d'implants ou de forages
10. Types ou marques d'implants
11. Marque CBCT
12. Résolution
13. Epaisseur de coupe
14. Systèmes de navigation
15. Moyen de mesure
16. Résultats
17. Biais

Cette liste peut évoluer en fonction des articles. Une étude présentant ses résultats de mesure uniquement après forage ne présentera pas de rubrique « marque d'implants ». Par ailleurs concernant les travaux in vivo le type de chirurgie peut être ajouté au détail.

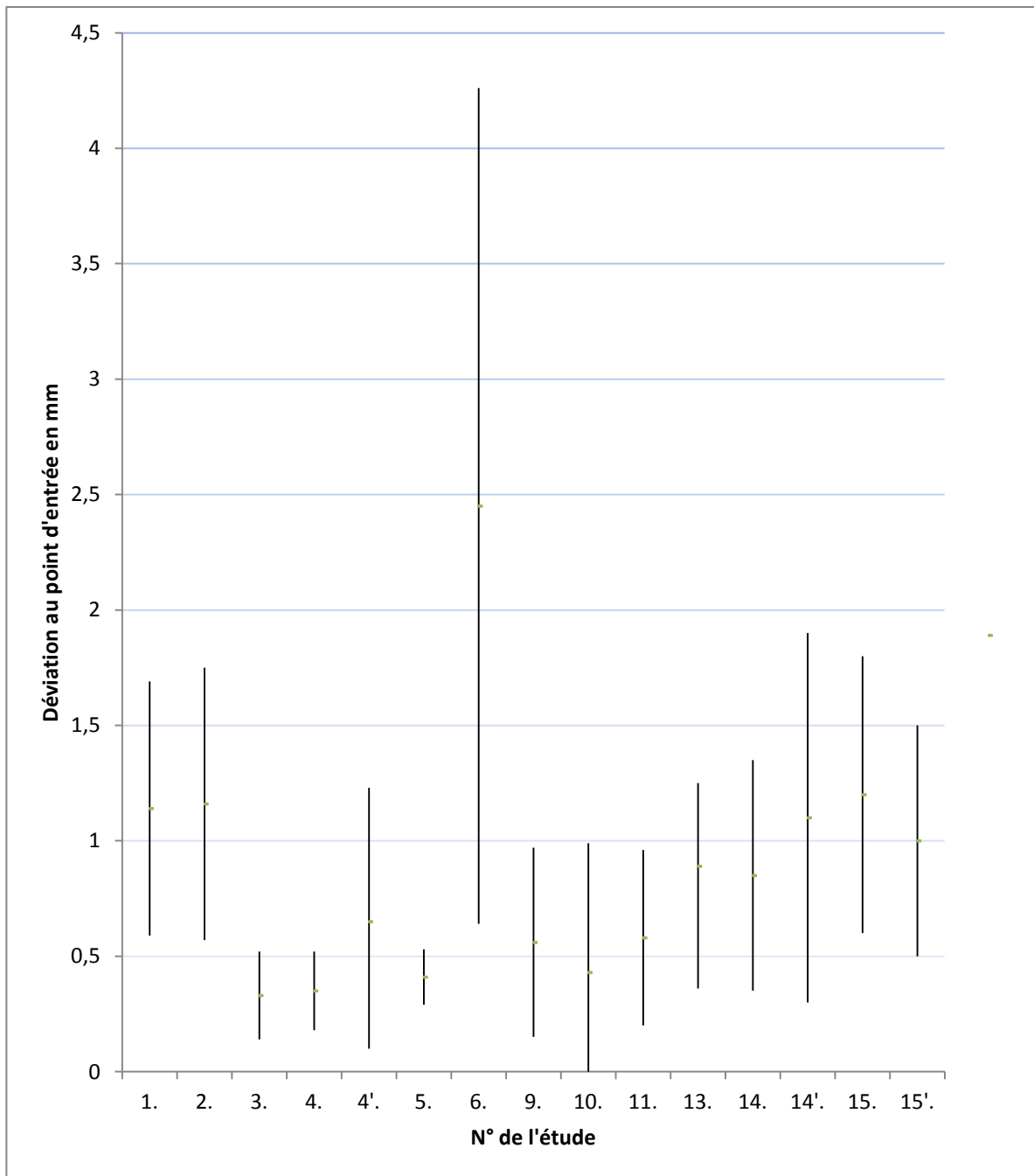
| N'article | 1 somogyi 2014 | 2 Block 2107 | 3 Emery 2016 | 4 Brief 2005 | 5 Kim 2014 | 6 Kang 2014 | 7 Meyer 2003 | 8 Hoffman 2005 | 9 Casap 2011 | 10 Chiu 2006 | 11 Wanschitz 2002 | 12 Kramer 2004 | 13 Elian 2008 | 14 Wittwer 2008 | 15 Ruppin 2008 | 16 Sun 2018 |
|--|---|---------------------|---|----------------------|---|--|--------------|----------------------|---------------|--------------|-------------------|----------------|---------------|------------------------------|---|-------------|
| Etude in vivo/vitro | In vitro | In vivo | In vitro | In vitro | In vitro | In vitro | In vivo | In vitro | In vitro | In vitro | In vitro | In vitro | In vivo | In vivo | In vitro | In vitro |
| Nombre patients /modèles | / | 478 | 27 modèles mandibulaires et maxillaires | 15 | 10 modèles Maxillaires et mandibulaires | 20 mandibules | 2 (cochons) | 16 mandibules | 40 mandibules | 8 mandibules | 5 mandibules | 40 maxillaires | 6 | 16 | 20 mandibules | 50 |
| Moyen de mesure | Compas | CBCT | CBCT | Laser | CBCT | Scanner | / | Scanner | Jauge | Jauge | Scanner | Scanner | Scanner | CBCT | Scanner | Scanner |
| Système de Navigation | Navident Nobelguid e SurgiGuide Straumann Guide | X-Guide | X-Guide | Robodent et IGI DenX | IGI denX | CBYONSuite Guide Stéréolitho graphique | Robodent | VectorVision Compact | IGI DenX | IGI DenX | VISIT | IGI DenX | IGI DenX | VISIT et StealthSation Treon | Robodent, Artma Virtual Patient , et SurgiGuide | AQNAvi |
| Nombre Implants /forages | 2000 | 714 | 30 | 45 | 110 | 80 | 8 | 224 | 240 | 80 | 20 | 80 | 14 | 64 | 120 | 150 |
| Utilisation partielle ou totale | Partielle | Partielle et totale | Totale | Partielle | / | Totale | Totale | Partielle | Partielle | Partielle | Totale | Totale | Totale | Totale | Totale | Partielle |

Tableau 7: Résumé des 16 études sélectionnées

| N°article/Nom | Système d'exploitation | Erreur point d'entrée, Error entry a | Erreur à l'apex, Error Apex b | Erreur d'angulation, Angular Error A | Profondeur Apex c |
|-------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1 Somogyi 2014 | Navident | 1.14 ± 0.55 (0.04-3.64) | 1.18 ± 0.56 (0.055-3.19) | 2.99 ± 1.68 (0.14-11.94) | 1.04 ± 0.71 (0.00-3.34) |
| 2 Block 2017 (vivo) | X-Nav | 1.16 ± 0.59 | 1.29 ± 0.65 | 2.97± 2.09 | 0,78 ±0,6 |
| 3 Emery 2016 (vitro) | X-Nav | 0,33±0,19 (0,83) | 0,36±0,20 (0,91) | 1,09±0,55 (2,47) | 0,25±0,19 (0,96) |
| 4 et 4' Brief 2005 | Robodent | 0 ,35±0,17 (0 ,1-0,75) | 0,47±0,18 (0,1-0,62) | 2,12±0,78 (0,9-3,64) | 0,32±0,21 (0-0,71) |
| | IGI,DenX | 0,65±0,58 (0,1-2,37) | 0,68±0,31 (0-1,22) | 4,21±4,76 (0,9-20,43) | 0,61±0,36 (0,1-1,43) |
| 5 Kim 2014 | IGI,DenX | 0,41±0,12 (0,2-0,72) | 0,56±0,14 (0,2-0,98) | 2,64±1,31 (0-6,2) | |
| 6 Sang-Hoon Kang 2014 | CBYON Suite navigation | 2,45±1,81 | 3,03±2,07 | 10,67±3,83 | 1,69±1,01 |
| 7 Meyer 2003 | Robodent | <0,5mm | <0,5mm | <0,5mm | |
| 8 Hoffman 2005 | Vector Vision Compact | | | 4,2±1,8 (2,3-11,5) | 0,7±0,5 (0,1-3) |
| 9 Casap 2011 | IGI, DEnX | 0 ,56±0,41 | | | |
| 10 Chiu Wk | IGI, DenX | 0.43 ± 0.56 (0.00-2.23) | | 4 ± 3.5 (0.00-13.6) | 0.37 ± 0.28 (0.00-1.04) |
| 11 Wanschitz | VISIT | 0,58±0,38 (0,0-1,5) | 1,4±0,79 (0,0-3,5) | | |
| 12 Kramer 2004 | IGI, DenX | 0,29 (0-<0,5) | | 2,26 (0-<5) | 0,23 (0-<0,5) |
| 13 Elian 2008 | IGI,DenX | 0,89±0,53 | 0,96±0,50 | 3,78±2,76 | |
| 14 et 14' Wittwer 2008 | VISIT | 0,85±0,5 (0,3-2) | 0,65±0,3 (0,3-1) | | |
| | TREON | 1,1±0,8 (0,1-3,4) | 0,75±0,6 (0,00-2) | | |
| 15 et 15' Ruppin 2008 | Artma Virtual Patient | 1,2±0,6 (0,2-2,4) | | 8,1±4,9 (1,5-18) | 0,8±0,7 (0-1,1) |
| | Robodent | 1±0,5 (0,2-2,9) | | 8,1±4,6 (2-23,5) | 0,6±0,3 (0-3,1) |
| 16 Sun 2018 | AQNAvi | | | 3,18±2,92 | |

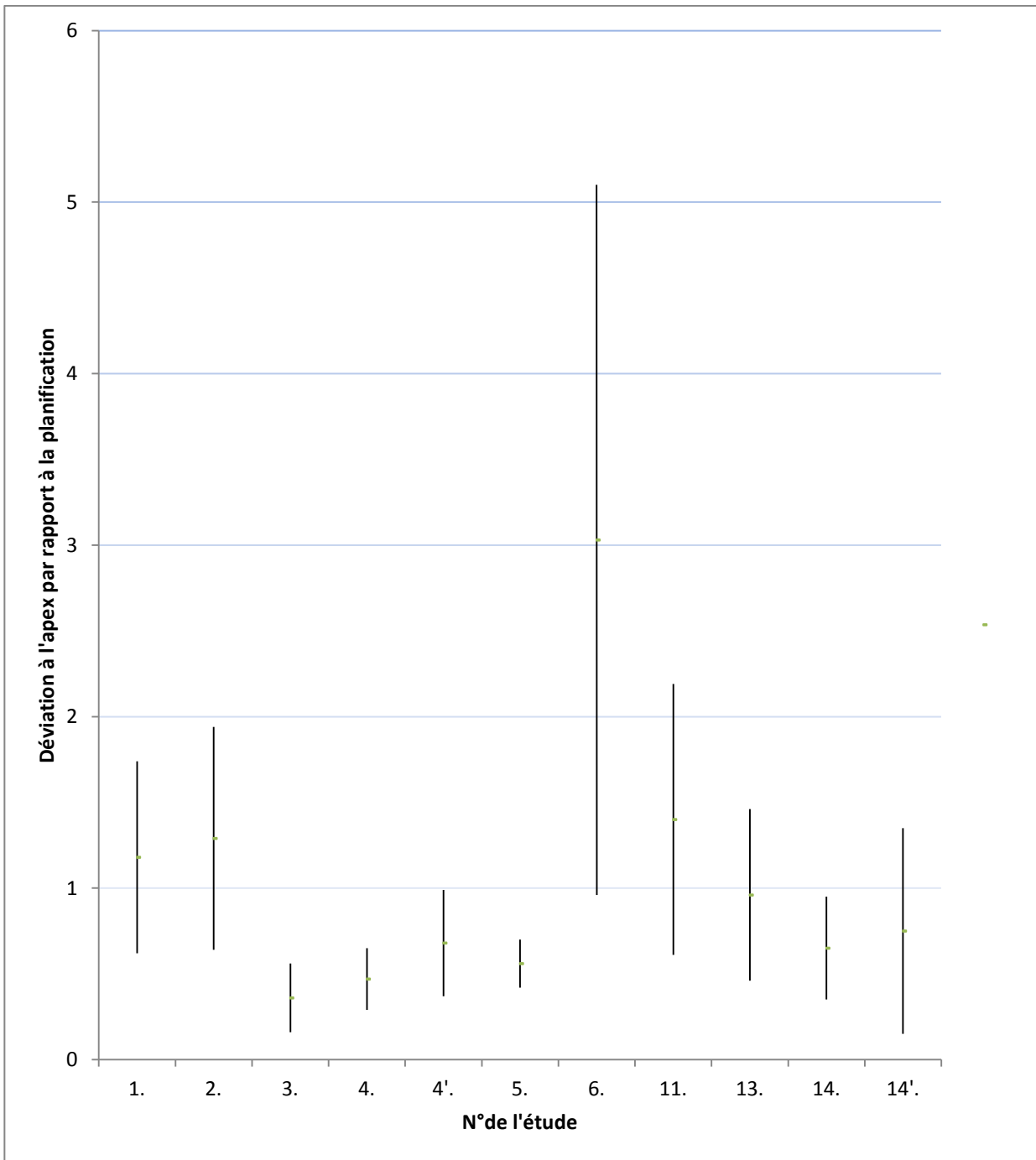
Tableau 8: Mesures de Précisions des 16 études sélectionnées

Tableau 9: Déviation au niveau du col implantaire ou point d'entrée du forage par rapport à la planification, a



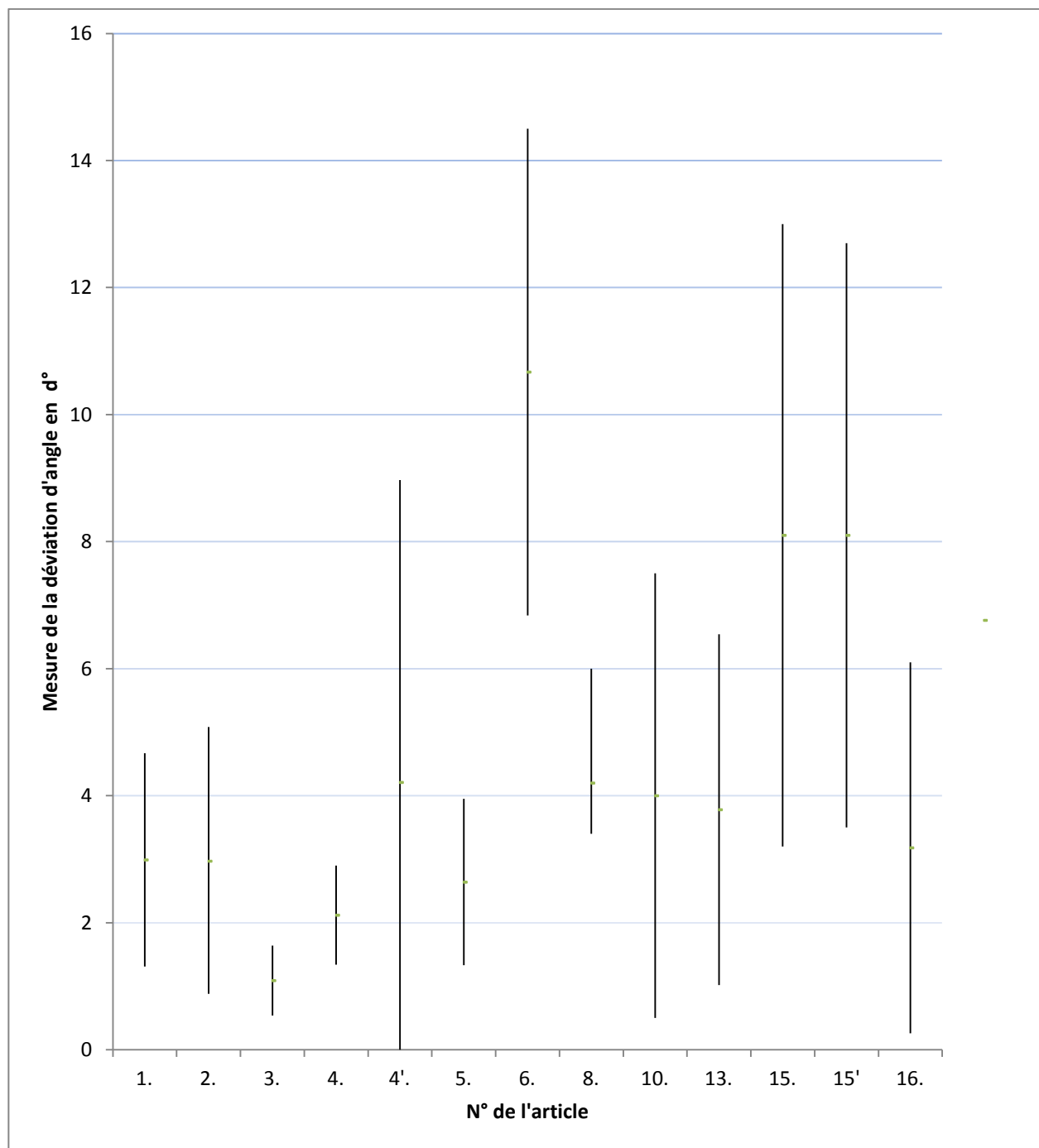
La moyenne de la déviation au point d'entrée et la dispersion des données (écart type) sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 10: Déviation ou erreur à l'apex par rapport à la planification



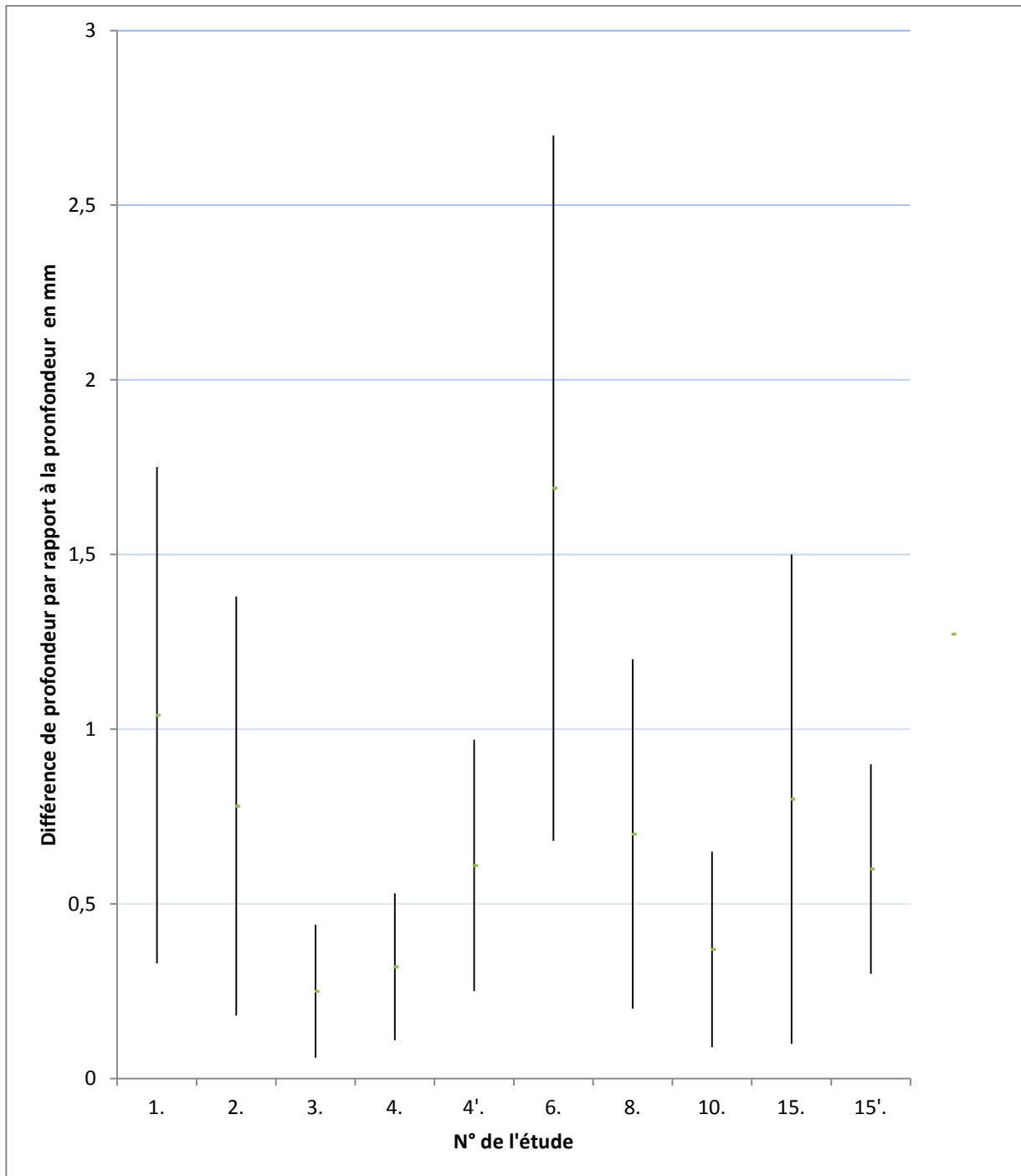
La moyenne de la déviation à l'apex (en mm) et la dispersion des données (écart type) sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 11: Déviation Angulaire par rapport à la planification



La moyenne de la déviation angulaire par rapport à la planification et la dispersion des données (écart type) sont représentées dans le graphique ci-dessus.

Tableau 12: Erreur de profondeur à l'apex par rapport à la planification



La moyenne de la différence de profondeur à l'apex (en mm) par rapport à la planification ainsi que la dispersion des données (écart type) sont représentées dans le graphique ci-dessus.

3.1.2 Discussion et hypothèses concernant la précision des guides chirurgicaux dynamique :

L'étude n°6 de *Kang et al*(30), présente pour l'ensemble des 4 paramètres évalués un écart type fort, signe d'une forte dispersion des mesures avec une faible reproductivité. Cybon Suite System est un système de navigation pour la neurochirurgie ici adapté et greffé à Simplant, un logiciel de planification implantaire. Les mêmes auteurs que l'article n°9, *Casap et al* (21) en 2008 proposent d'étudier et de comparer la précision de deux systèmes : le premier issu de la chirurgie maxillo-faciale (Landmark) et le second dédié et conçu pour l'implantologie (IGI, DenX). Les résultats donnent une précision moyenne nettement supérieure pour ce dernier :

| Système d'exploitation | Image Guided implantology | Landmarx Medtronic |
|--|---------------------------|--------------------|
| Précision moyenne en mm entre la position réelle et supposée des outils chirurgicaux | <0,5mm | 3-4mm |

Ces mesures pourraient expliquer pourquoi dans l'article de *Kang et al*(30), en utilisant Cybon Suite Systems adaptée de la chirurgie spinale, les données obtenues sont plus élevées que dans les autres études .

L'étude n°7, *Meyer et al*(31) n'est pas présente dans ces graphiques. Si les auteurs ont souhaité évaluer la précision de la chirurgie guidée dynamique, ils ont présenté leurs résultats de façon schématique ne pouvant convenir à un traitement des données chiffrées comme ci-dessus. On constate cependant que se soit pour a, b et c, que les valeurs obtenues sont inférieures à 0,5mm.

Concernant l'analyse de ces données :

Pour la valeur « a », la médiane est de 0,85mm et la valeur moyenne de 0,83mm. Si on excepte la mesure de « a » dans l'étude n°6 pour les raisons évoquées ci-dessus, la valeur moyenne des écarts par rapport à la planification est alors de 0,72mm.

Pour la valeur « b », la médiane est de 0,71 mm et la valeur moyenne de 1,03mm. Cette valeur moyenne est de 0,83mm si on ne considère pas l'étude n°6.

Pour la valeur de « α », la valeur médiane est de 3,39° et la moyenne de 4,4°. De nouveau, si on écarte la valeur trouvée dans le travail n°6, l'écart angulaire est de 3,87°.

Pour la valeur de « c », la valeur médiane de la profondeur mesurée est de 0,61mm, et la moyenne de 0,67mm. La moyenne est de 0,57mm si l'étude n°6 n'est pas intégrée dans le calcul.

Sur les 16 articles, 5 ont pour objet de comparer la précision de la navigation mentale versus de la navigation dynamique : l'étude n°2 *Block et al*(32), l'étude n°1 *Somogyi-Ganss et al*(26), l'étude n°4 *Brief et al*(23), l'étude n°8 *Hoffman et al*(33) et l'étude n°12 *kramer et al*(34). Les résultats obtenus convergent vers une amélioration de la précision avec le guidage dynamique.

Par ailleurs *Block et al*(32), étude la plus récente et la seule faite in vivo sur les 5, propose une comparaison entre le « full guided » et la « partially guided » : dans le 1^{er} cas le forage et la pose sont réalisés sous navigation dynamique par le chirurgien, dans le second cas seul le forage est réalisé sous navigation dynamique. La comparaison de résultats entre « FG » et « PG » suggère que lorsque la navigation dynamique n'est pas utilisée tout au long de la chirurgie, la précision diminue. Cette notion est aussi développée par l'étude n°3 *Emery et al* (27).

Kramer et al(34) ainsi que *Black et al*(32) notent que la variable la plus contrôlée par la navigation dynamique en comparaison de la navigation mentale semble être l'angulation (la valeur α).

Brief et al(23), proposent 5 facteurs pouvant influencer la précision de l'IGI :

- la qualité d'image (CBCT ou scanner)
- le système de navigation et le type de caméra optique infra rouge,
- la qualité de l'enregistrement (stabilité de la gouttière et des fixations des marqueurs),
- le caractère instantané de l'interaction opérateur/machine,
- le mauvais calibrage ou la mauvaise lecture du dispositif par l'opérateur.

Hoffman et al(33) décrivent 3 perforations du plafond cortical du nerf alvéolaire inférieur et 7 perforations de la corticale linguale sous navigation mentale ou « free-hand », contre aucune sous navigation dynamique.

3 travaux sur les 16 présentent une opposition entre chirurgie guidée statique et chirurgie guidée dynamique : l'étude n°1 *Somogyi-ganss et al*(26), l'étude n°6 *kang et al*(30) et l'étude n°15 *Ruppin et al*(29).

L'étude de *kang et al*, trouve une précision meilleure du guide stéréolithographique.

Le travail de *Ruppin et al* ne montre aucune différence significative entre les deux méthodes.

Somogyi-ganss et al quant à eux, dans une étude in vitro après 2000 forages, comparent les mesures de précision obtenues de 4 guides statiques (guide de laboratoire, guide Straumann, SurgiGuide, NobelGuide) et un guide dynamique (Navident). Les résultats sont les suivants :

- une précision supérieure est retrouvée au système Navident par rapport au guide de laboratoire.
- aucune différence significative n'est mesurée avec les guides Strauman, Dentsply et Nobel.

Le visuel en temps réel de la position de l'instrument sur l'écran de navigation permet une autocorrection immédiate du geste chirurgical(26,34,35). De par ce fait, *Somgyi-ganss et al* émettent l'hypothèse d'un risque d'effet « entonnoir » lors du forage : le chirurgien modifiant légèrement la position du foret pour corriger l'axe, créant un effet « widening » ou d'élargissement.

L'écart entre la planification souhaitée et le résultat obtenu semble être plus important à l'apex qu'au point d'entrée : la sécheresse des mandibules et la qualité osseuse(28), la pression exercée nécessaire au premier forage(26,35) pourraient expliquer cette différence.

La précision semble être meilleure lorsque le patient n'est pas totalement édenté (27). Le taux d'erreur pourrait être 2 à 3 fois supérieur lors d'un édentement étendu (>3 dents) par rapport à un édentement unitaire.(26)

Chiu et al(36), étude n°10, ne trouvent pas de différence de précision selon que le site chirurgical soit à droite ou à gauche, en position proximale ou distale. Cependant cela ne semble pas faire consensus : d'autres études suggèrent que le forage est d'avantage précis à la mandibule plutôt qu'au maxillaire(26), en position antérieure plutôt que postérieure(30,35).

L'étude la plus récente, de *Sun et al*(37), étude n°16, explique ne pas avoir trouvé de différence de précision entre le maxillaire et la mandibule, mais note cependant des résultats qui diffèrent en fonction de la localisation sur l'arcade.

Par ailleurs la dextérité droite ou gauche de l'opérateur semble avoir un impact sur la reproduction fidèle au projet implantaire initial : à la mandibule un droitier obtient de meilleurs résultats secteur 3 plutôt que secteur 4.(35)

Ruppin et al(29)explique que les biais de précisions peuvent être : **Intrinsèques** (résolution du CBCT, traitement des données d'images, logiciel de planification, erreurs d'enregistrement, erreurs de localisation optique) ou **extrinsèques** (opérateur dépendant).

La position des diodes émettrices, le site et le type d'attaches des marqueurs sur le patient ainsi que la position de la caméra, jouent un rôle sur la précision finale : plus le champ « camera/marqueurs/site opéré » est restreint et meilleure semble être la précision(38).

Par ailleurs la fixation des cibles aux tissus dentaires par une gouttière en cire peut être une alternative de choix dans la chirurgie cranio-faciale(39) et notamment lors de la chirurgie implantaire à la mandibule(21).

Cependant *Ewers et al*(17) notent que des mini implants osseux offrent une meilleure fixation du traceur par rapport aux appuis dentaires.

3.2 Avantages et inconvénient de la navigation dynamique implantaire

En chirurgie orale les systèmes de navigation dynamique sont utilisés pour la résection de tumeurs(40), pour la chirurgie orthognatique(36), pour chercher des aiguilles d'anesthésies dentaires brisées(41,42), ou encore pour le bris d'instrument endodontique à l'apex de dents(43).

Outre la précision, quels peuvent-être les avantages et inconvénients à utiliser ce système de « Tracking optique » dans le cadre de la chirurgie implantaire ?

3.2.1 Le temps

Ewers et al (17) décrivent à travers 7 années d'études cliniques menées, une réduction par 6, du temps nécessaire de la prise en charge du patient, à la pose de l'implant sous navigation guidée. Ils expliquent ce gain de temps, par l'amélioration de la vitesse d'exécution des algorithmes au sein des logiciels.

Casap et al(44) retrouvent un temps d'exécution plus long chez les étudiants novices ayant réalisé l'implantation sous IGI versus les étudiants débutants ayant réalisé l'acte sans système de guidage.

Sun et al(37) montrent que plus l'utilisation du guide dynamique est fréquente et plus le temps opératoire diminue.

Wittwer et al(22)montre l'importance de l'efficacité du système de détection des mouvements et de la puissance des outils numériques dans la planification et l'exécution du geste. Une différence de 25% de temps supplémentaire pour le système VISIT par rapport au système StealthStation Treon est trouvée.

La mise en place du dispositif (caméra, cible, gouttière) et le calibrage des forets peuvent être chronophages(22).

La navigation chirurgicale dynamique permet de poser l'indication d'implants, de faire la planification et de réaliser la chirurgie dans la même journée(18).

3.2.2 La courbe d'apprentissage

La courbe d'apprentissage, correspondant au temps nécessaire à la maîtrise de la navigation dynamique, est évoquée dans nombres d'articles(17,18,20,30,32,34,44,45). Elle est liée à l'expérience implantaire du chirurgien, à la connaissance du protocole, au changement ergonomique, à l'adaptation de l'équipe chirurgicale, ou encore à la vision indirecte.

La courbe d'apprentissage semble nécessiter 5 utilisations avant de tendre vers une asymptote de progression(37).

3.2.3 L'ergonomie

Casap et al(44) en 2011 évaluent l'intérêt de la navigation dynamique comme outils d'entraînement à la chirurgie implantaire. Ils comparent deux groupes de 20 étudiants en dernière année de chirurgie dentaire : un premier groupe témoin, n'utilisant pas la chirurgie guidée et le second groupe l'utilisant.

75% des étudiants ayant essayé la navigation guidée dynamique, disent vouloir l'utiliser dans leur futur exercice.

Les éléments retenus à l'encontre de L'IGI par les étudiants sont :

- le poids du rotatif avec le dispositif de cible ou de « tracking »
- l'ergonomie lors de la prise en main inconfortable
- la difficulté rencontrée du fait de la vision indirecte.

Selon les auteurs l'intérêt du dispositif dans l'initiation à l'implantologie n'est pas significatif.

Casap et al(21) dans un autre article soulignent la nécessité de ne pas avoir d'interférence physique entre les cibles marqueurs et la caméra. Le chirurgien et ses assistants, devront se placer idéalement dans la pièce opératoire pour ne pas gêner le déroulement de l'intervention(45).

L'opérateur lors de l'intervention a une position plus ergonomique, il regarde son moniteur et ne se contorsionne pas pour chercher une vision directe(32).

Le dispositif est mobile et son volume relativement restreint(18,20): un pied de perfusion sur roulettes, un ordinateur portable, un panneau de LED et une caméra.

3.2.4 Flexibilité dans le plan de traitement

L'opérateur à la différence des chirurgies guidées statiques, sous assistance dynamique guidée, peut modifier le plan de traitement à n'importe quel moment de la chirurgie(13,17,18,23,32,45,46).

3.2.5 Coût :

L'investissement initial est important par rapport aux guides chirurgicaux statiques(18,30).

Pour le Navident (développé par ClaroNav), le prix d'achat du dispositif est autour de 25 000 euros.

Les kits de procédures sont jetables. Un kit est nécessaire par chirurgie. Le prix du kit est de 70 euros.

En cas d'édentement complet, un kit muni de mini-implants est nécessaire.

3.2.6 Le patient

A contrario de la navigation mentale obligeant à une exposition osseuse, pour avoir une bonne visibilité du site, la navigation dynamique autorise et favorise une chirurgie sans lambeau ou flapless(13,47).

Avec un accès libre au site à implanter, l'irrigation nécessaire pour éviter la surchauffe de l'os lors du forage(7), est plus efficace que lors de l'utilisation de guides statiques(45).

La chirurgie sans lambeau et la maîtrise de l'irrigation, favorisent la cicatrisation, et diminuent les douleurs postopératoires.

Le modèle de fixation avec mini-vis dans le cadre de la chirurgie implantaire de l'édenté total présente un caractère invasif.(21,27,39)

Le tableau ci-dessous compare le caractère invasif et l'ergonomie de chaque système en fonction du type d'attache des récepteurs(21) :

| Attache du système | Tissu support | Attache invasive Ou non invasive | Structure anatomique référente | Montage et démontage |
|---------------------------|----------------------|---|--|---|
| Tissus mous | Tissus mous | Non invasif | Tête du patient | Les mouvements du patient peuvent démonter le système, nécessitant alors un nouvel enregistrement |
| Tissus osseux | Tissus durs | Invasif | Nécessite une large structure osseuse, impossible à mettre en œuvre en maxillo-faciale | Le dévissage du capteur est possible mais nécessite au remontage un nouvel enregistrement |
| Tissus dentaire | Tissus durs | Non invasif | La mandibule ou maxillaire opéré | Montage et démontage reproductible grâce à l'occlusion, pas de nouvel enregistrement à chaque démontage |

Tableau 13: Invasivité et type d'attache

3.2.7 Stabilité et reproductibilité

Pour tous les systèmes de navigation l'importance de la stabilité et du repositionnement est cruciale(18,45,48).

Par ailleurs, l'occlusion entre le scan et la phase chirurgicale ne doit pas être modifiée (nouvelles couronnes provisoires par exemple) au risque de ne plus pouvoir placer la gouttière et les marqueurs de façon reproductible(32).

La gouttière occlusale comme support des marqueurs semble être une alternative fiable(39)

| Investigator | Registration Technique | Reported TRE (mm) |
|-----------------------------------|---|--------------------|
| Schramm et al, ¹² 2001 | Bone screws | 0.9 |
| Marmulla et al, ⁸ 2003 | Occlusal splint Surface registration | 0.9-1.3 0.2-1.8 |
| Sun et al, ¹⁸ 2013 | Anatomic landmarks | 0.9 |

Tableau 14 précision en fonction du support des marqueurs

Concernant les chirurgies relatives à la mandibule, trois approches sont généralement possibles(21) :

- l'immobilisation du maxillaire inférieur. Cette solution présente le désavantage de limiter l'accès au site opéré, voire de rendre l'intervention impossible. Une approche extra-orale est alors indiquée.
- l'utilisation d'une position reproductible de la mandibule (utilisation de guides ou de la position de relation centrée). Cette technique présente le désavantage d'être extrêmement sensible aux mouvements mandibulaires, et donc aux erreurs de précisions.
- l'utilisation d'un capteur avec un système de traceurs optiques, qui permet un monitoring en temps réel de la position mandibulaire.

Jabero et al(12) dressent les inconvénients respectifs de la navigation mentale, des guides chirurgicaux statiques et de la robotique active qu'on ne retrouve pas dans l'IGI :

| | Inconvénients |
|----------------------------|--|
| Navigation mentale | <ul style="list-style-type: none"> • Basée sur expérience de l'opérateur • Nécessité de bonne vision du site opéré (morbidité ++) • Mouvement en « arc de cercle » de la main • Déviations possibles avec différence de densité osseuse (implantation immédiate) |
| Guides chirurgicaux | <ul style="list-style-type: none"> • Déviation axiale du foret si diamètre tube >Forets • Temps nécessaire important pour changer diamètre des tubes du guide |
| Robot chirurgicaux | <ul style="list-style-type: none"> • Nécessite une immobilisation parfaite du patient (AG non recommandée en implanto) |

Tableau 15:Inconvénients des différentes navigations implantaire

3.2.8 Résumé avantages +/-inconvénients - :

Avec l'ensemble des informations relevées dans la littérature on peut dresser le tableau suivant :

| Avantage + / inconvénients - | Système de Navigation Dynamique | Système de navigation statique | Navigation mentale |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Ergonomie, Vision indirecte | + | + /- | +/- |
| Précision | +/- | + | - |
| Morbidité | + | +/- | + |
| Flexibilité PTT | + | - | + |
| Irrigation | + | - | + |
| Coût | - | - | + |
| Stabilité/rétention | + /- | + /- | / |
| Ratio Tps apprentissage/maitrise | + /- | + | / |

Tableau 16: Avantages et inconvénients de la navigation passive

L'une des difficultés rencontrées lors de l'utilisation d'un système de navigation passive est le travail en vision indirecte. L'opérateur regarde son écran, témoin de la situation en bouche. Une nouvelle organisation de l'équipe opératoire est alors nécessaire.

La reproduction de la planification implantaire initiale est loin d'être idéale, que ce soit pour les guides chirurgicaux statiques et dynamiques, et pour la navigation mentale. Cependant l'utilisation d'un outil de guidage montre une précision supérieure.

La navigation passive permet d'avoir une vision dégagée du site opératoire. Une chirurgie avec des lambeaux moins volumineux voir « flapless » est alors possible. L'accès garantit une irrigation efficace, évitant toute surchauffe des tissus environnants. Les suites opératoires sont moins douloureuses et plus appréciées par les patients.

L'opérateur est maître de son geste, et peut à contrario de la chirurgie guidée statique modifier l'axe implantaire lors du forage.

Le coût d'un système de guidage reste important : Pour la chirurgie guidée statique, il revient au prix de conception du guide chirurgical. Concernant la navigation dynamique, le coût est d'abord initial, avec l'acquisition du système de navigation, puis s'ajoute le prix pour chaque chirurgie, des cibles réceptrices et de la gouttière de navigation (système Navident). Ces instruments rendus stérilisables et réutilisables, pourraient alors diminuer les coûts.

La position reproductible et la stabilité de la gouttière de navigation sont impératives pour éviter tous biais lors du déroulement de la thérapeutique.

Un temps d'apprentissage est nécessaire pour maîtriser la technologie de guidage dynamique.

3.3 Indication de la navigation dynamique

Compte- tenu de la revue de littérature effectuée, un tableau restituant les indications de la chirurgie implantaire dynamique, peut être proposé :

| INDICATIONS |
|---|
| Ouverture de bouche limitée |
| Imagerie et pose d'implants le même jour |
| Visualisation directe impossible |
| Espace insuffisant entre 2 dents pour permettre l'utilisation d'un guide statique |
| Guide chirurgicale statique interfère avec la chirurgie |
| Site d'intervention distal |
| Réflexes nauséux importants |
| Travail en équipe |

Tableau 17: Indications de la navigation dynamique

Certaines situations cliniques rendent incompatibles l'utilisation de guides chirurgicaux statiques: une ouverture de bouche limitée, constitutionnelle ou acquise, un réflexe nauséux important, ou encore un site opératoire distal.

Lors d'une situation de handicap, ou le patient ne peut pas maintenir sa bouche ouverte, la mise en place d'un cale bouche, avec une visualisation directe du site d'intervention est possible lors de l'utilisation de la navigation passive.

L'opérateur travaillant en vision indirect, l'assistant contrôle directement en bouche le forage et la mise en place de l'implant. Un travail coordonné et en équipe est de rigueur.

L'examen d'imagerie, la planification et la chirurgie peuvent être programmés le même jour. Le temps nécessaire à la conception du guide chirurgical est shunté.

4 Conclusion

L'implantologie est une discipline en constante évolution. L'apport de l'outil informatique dans la planification, la conception et le guidage ont transformé la pratique implantaire dans les cabinets dentaires.

La complexité de la prise en charge implantaire réside toujours en l'indication, l'analyse, et l'élaboration du plan de traitement

Un accès à l'acquisition de moyens d'imagerie 3D pour les cabinets libéraux, permis par une baisse des coûts et une miniaturisation des systèmes, a rendu compatible, la pratique implantaire libérale et l'utilisation des systèmes de guidages dynamiques.

De nombreux systèmes sont proposés sur le marché. Ils utilisent de façon très majoritaire une technologie optoélectronique.

Le nombre d'articles sur le sujet n'est pas aussi fourni que pour l'étude des guides chirurgicaux statiques. Des études in vivo, avec des cohortes importantes, à l'image de l'étude de *block et al(32)* sont à attendre dans le futur.

Une tendance se dégage cependant : avec une précision moyenne de l'ordre du millimètre au niveau proximal et distal, du demi-millimètre concernant la profondeur et d'une déviation d'angulation inférieure à 5°, l'outil semble présenter un avantage certain par rapport à la navigation mentale. En revanche aucune amélioration, voire une baisse de précision est constatée par rapport aux guides chirurgicaux statiques.

Le guidage par l'image en implantologie est un outil complémentaire aux moyens dont disposent d'ores déjà les chirurgiens dentistes libéraux dans leur arsenal thérapeutique.

A l'instar de la chirurgie guidée statique, la robotique passive présente ses avantages et inconvénients et répond à des indications bien précises.

Dans un avenir à court ou moyen terme, peut être deviendra t'elle l'outil de référence quant à l'objectif d'une reproduction à l'identique de la planification initiale ?

5 Annexes

5.1 Etudes

Au sein des tableaux, les résultats sont présentés sous la forme suivante : Moyenne \pm Ecart type (valeurs maximales)

Etude n°1(26)

- **Titre** : *Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system*
- **Auteurs**: Eszter Somogyi-Ganss, Howard I.Holmes et Asbjorne Jokstad
- **Année de publication** : 2014
- **Mots clés PubMed** : accuracy, computer guided, dental implants, navigation
- **Type d'étude** : Etude comparative, In Vitro
- **Nombre de modèles** : non communiqué (réutilisation des modèles après chaque protocole)
- **Nombre d'opérateurs** : 3
- **Nombre de forage** : 5*(8 maxillaires + 8 mandibulaires)*5 protocoles* 3(+2) opérateurs, soit 2000 forages
- **Type de forage** : Forets Straumann 4mm/10mm
- **Type d'édentement** : 3 dents maxillaires (13, 23,27) et 3 dents mandibulaires (33, 37,43) présentes
- **Marque CBCT** : CB Mercur-Ray , Hitachi Medical Systems
- **Résolution Volumique**: FOV=10cm, 100Kv, 10mA
- **Logiciels d'exploitations et systèmes de navigations** : Navident ClaroNav Technology (dynamique), Nobel clinicians, simplant et strauman guided surgery (statique)
- **Moyen de mesure** : Jauge
- **Résultat** :

| | Guide de laboratoire | Guide chirurgicale Straumann | SurgiGuide Simplant | NobelGuide | Navident (prototype ClaroNav) |
|---|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Erreur point d'entrée (mm) | 1,14 \pm 0,68 (0,02-4,95) | 0,9 \pm 0,48 (0,05-4,66) | 0,76 \pm 0,54 (0,02-2,92) | 0,81 \pm 0,55 (0,05-4,31) | 1,14 \pm 0,55 (0,04-3,64) |
| Erreur position latérale à l'apex (mm) | 1,74 \pm 1,07 (0,04-5,95) | 1,19 \pm 0,62 (0,09-4,78) | 0,99 \pm 0,64 (0,07-3,36) | 1,24 \pm 0,8 (0,02-5,99) | 1,18 \pm 0,56 (0,05-3,19) |
| Erreur profondeur apex (mm) | 0,73 \pm 0,71 (0,00-3,40) | 1,05 \pm 0,86 (0,00-4,81) | 1,1 \pm 0,79 (0,00-2,98) | 1,27 \pm 0,86 (0,00-4,06) | 1,04 \pm 0,71 (0,00 \pm 3,34) |
| Angulation en d° | 8,95 \pm 4,65 (0,33-20,79) | 3,31 \pm 1,86 (0,20-12,52) | 3,09 \pm 1,9 (0,16-14,58) | 4,24 \pm 2,66 (0,09 \pm 6,23) | 2,99 \pm 1,68 (0,14-11,94) |

- **Biais** : Etude in Vitro, réutilisation des modèles, forages comblés avec du ciment radio-opaque (Frasaco GmbH), utilisation de « jigs », pour les mesures, pas de second CBCT pour la mesure, Navident au stade prototype.

Etude n°2(32)

- **Titre :** *Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation*
- **Auteurs :** Michael S.Block, Robert W.Emery, Daniel R.Cullum, Ali Sheikh
- **Année de publication :** *Fevrier 2017*
- **Mots clés Pubmed:** implant dynamic navigation
- **Type d'étude :** *prospective, In vivo*
- **Nombre de patient :** 478
- **Nombre de chirurgien opérateur :** 4 (planification et chirurgie)
- **Type de procédure :** Navigation dynamique complète (NDC), Navigation dynamique partielle (pas de pose d'implants)(NDP), Navigation mentale (NM)
- **nombre implant posé :** 219 (NDC) , (373) NDP, (122) NM
- **Marques implants :** Non précisé
- **Taille implants :** Non communiqué
- **Types d'édentements :** Non communiqué, un édentement unitaire au moins et 3 dents adjacentes sur l'arcade a implanter
- **Marque de CBCT/Scan :** Non précisé
- **Résolution CBCT :** non communiqué
- **Marque du système de Navigation :** X-Nav
- **Méthode chirurgicale :** *Non précisé*
- **Moyen de mesure :** CBCT
- **résultat de l'étude :**

| Surgeon | Angular deviation (degree) | Global Platform (mm) | Platform depth deviation (mm) | Platform lateral deviation (mm) | Global Apical (mm) | Apical depth deviation (mm) | Apical lateral deviation (mm) | Number of Implants |
|-------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Fully Guided | | | | | | | | |
| 1 | 2.43 (1.36) | 1.00 (0.49) | 0.74 (0.55) | 0.57 (0.30) | 1.13 (0.53) | 0.73 (0.54) | 0.76 (0.37) | 85 |
| 2 | 3.14 (2.54) | 1.31 (0.56) | 0.81 (0.58) | 0.94 (0.42) | 1.38 (0.63) | 0.82 (0.59) | 0.98 (0.57) | 77 |
| 3 | 2.46 (1.05) | 1.07 (0.61) | 0.95 (0.71) | 0.43 (0.17) | 1.16 (0.64) | 0.91 (0.71) | 0.61 (0.31) | 10 |
| 4 | 3.76 (2.23) | 1.22 (0.70) | 0.76 (0.68) | 0.82 (0.52) | 1.45 (0.81) | 0.77 (0.70) | 1.08 (0.73) | 47 |
| Total | 2.97 (2.09) | 1.16 (0.59) | 0.76 (0.60) | 0.74 (0.43) | 1.29 (0.65) | 0.78 (0.60) | 0.90 (0.55) | 219 |
| Partially Guided | | | | | | | | |
| 1 | 2.86 (1.78) | 1.20 (0.64) | 0.85 (0.70) | 0.70 (0.40) | 1.39 (0.69) | 0.86 (0.71) | 0.95 (0.53) | 255 |
| 2 | 4.86 (2.88) | 1.55 (0.73) | 0.89 (0.84) | 1.08 (0.52) | 1.77 (0.92) | 0.88 (0.82) | 1.34 (0.85) | 78 |
| 3 | 4.81 (2.78) | 1.70 (0.68) | 1.38 (0.74) | 0.87 (0.40) | 2.01 (0.75) | 1.48 (0.71) | 1.31 (0.65) | 24 |
| 4 | 3.41 (2.43) | 1.27 (0.58) | 0.82 (0.51) | 0.88 (0.55) | 1.51 (0.76) | 0.84 (0.52) | 1.20 (0.71) | 16 |
| Total | 3.43 (2.33) | 1.31 (0.68) | 0.89 (0.73) | 0.80 (0.49) | 1.52 (0.78) | 0.90 (0.74) | 1.01 (0.65) | 373 |
| Freehand | | | | | | | | |
| 1 | 6.10 (4.14) | 1.86 (0.76) | 1.25 (0.73) | 1.24 (0.70) | 2.34 (1.04) | 1.17 (0.75) | 1.90 (0.95) | 67 |
| 2 | 7.74 (4.71) | 1.86 (0.84) | 1.12 (0.99) | 1.21 (0.69) | 2.44 (1.04) | 1.17 (0.99) | 1.97 (1.17) | 33 |
| 3 | 5.79 (3.45) | 1.63 (0.41) | 0.72 (0.73) | 1.26 (0.47) | 1.90 (0.80) | 0.72 (0.67) | 1.65 (0.76) | 11 |
| 4 | 5.96 (4.21) | 1.24 (0.71) | 0.77 (0.79) | 0.78 (0.52) | 1.68 (0.57) | 0.84 (0.75) | 1.30 (0.52) | 11 |
| Total | 6.50 (4.21) | 1.78 (0.77) | 1.12 (0.83) | 1.19 (0.68) | 2.27 (1.02) | 1.10 (0.82) | 1.84 (1.05) | 122 |

- **Biais de l'étude :** l'auteur principal est rémunéré par X-Nav Technologies Inc, la cohorte représente la patientèle de chaque chirurgiens et donc des échantillons différents. Sélection des patients avec au moins 3 dents adjacentes pour le clipage des marqueurs, pas de librairie implantaire dans le logiciel, 2 jours de formation pour les opérateurs.

Etude n°3(27)

- **Titre** : Accuracy of dynamic navigation for dental implant placement-model-based evaluation
- **Auteurs** : Robert W.Emery, Scott A.Merritt, Kathryn Land, Jason D.Gibb
- **Année de publication**: Octobre 2016
- **Mots clés Pubmed**: Dynamic navigation, dentals implants, computer-assisted surgery
- **Type d'étude** : Etude comparative, in vitro
- **Nombre modèle** : 27 (10 mandibulaires dentés(1), 11 maxillaires dentés(2) ,4 mandibulaires édenté (3) et 2 maxillaires édentés (4))
- **Nombre opérateur** : 1
- **Nombre d'implants** : 33 implants (11 (1), 11 (2), 11(3) et 14 (4)
- **Marque des implants** : Zimmer/Biomet 3i, hexagone interne 4mm*13mm
- **Type édentement** : Sites implantés communiqués, (3) edentement total
- **Marque CBCT** : Imaging Sciences international I-cat
- **Résolution volumique** : 0,3 Voxel
- **Logiciel d'exploitation et système de navigation** : X-guide navigation(X-Nav)
- **Biais de l'étude** : Faible nombre de modèles, étude in vitro (densité osseuse et mouvements du patient non pris en compte...)
- **Moyens de mesure** : CBCT
- **Résultat** :

| Système exploitation X-GUIDE Erreurs par rapport à la planification (en mm) | Modèles dentés Moyenne et Maxillaires / Mandibulaires | | Modèles édentés Maxillaires / Mandibulaires | Moyenne des modèles dentés et édentés |
|--|--|---|--|--|
| Point d'entrée (en mm) | 0,21±0,11 (0,52) | 0,18±0,09 (0,39) / 0,24±0,12 (0,52) | 0,50±0,18 (0,83) / 0,37±0,17 (0,66) | 0,33±0,19 (0,83) |
| Position latérale apex (en mm) | 0,22±0,13 (0,47) | 0,23±0,12 (0,40) / 0,20±0,13 (0,47) | 0,57±0,18 (0,91) / 0,38±0,1 (0,57) | 0,36±0,20 (0,91) |
| Profondeur (en mm) | 0,27±0,20 (0,96) | 0,34±0,25 (0,96) / 0,20±0,15 (0,5) | 0,21±0,18 (0,56) / 0,26±0,18 (0,55) | 0,25±0,19 (0,96) |
| Angulation en degré ° | 0,89±0,35 (1,52) | 0,78±0,24 (0,92) / 1,00±0,40 (1,52) | 1,26±0,67 (2,18) / 1,25±0,65 (2,47) | 1,09±0,55 (2,47) |

Etudes n°4 (23)

- **Titre :** *Accuracy of image-guided implantology*
- **Auteurs:** Jacob Brief, Dieter Edinger, Stefan Hassfeld, Georg Eggers
- **Année de publication:** 2005
- **Mots clés Pubmed:** Accuracy, Image-guided surgery, implantology
- **Type d'étude:** Comparative in vitro (2 systèmes de navigations dynamique Vs navigation mentale)
- **Nombre de modèles :** 16 (1 maître modèle, et 3 groupes de 5 modèles)
- **Type édentement :** non communiqué
- **Marque modèle :** PolyPlast , Arident
- **Nombre de forage :** 3/ modèle
- **Calibre forage :** Non communiqué
- **Nombre d'opérateur :** 5
- **Marque CBCT/Scanner :** Non communiqué
- **Marque Laser :** Bronze LS06-02, FARO technologies
- **Moyen de mesure :** Laser
- **Logiciel d'exploitation et système de navigation :**
 1. RoboDent GmbH
 2. IGI DenX system
- **Resultat :**

| Système exploité / Erreurs par rapport à la planification | Robodent System | DenX IGI System | Navigation mentale |
|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Point d'entrée (en mm) | 0,35±0,17 (0,1-0,75) | 0,65±0,58 (0,1-2,37) | 1,35±0,56 (0,5-2,16) |
| Position latérale apex (en mm) | 0,47±0,18 (0,1-0,62) | 0,68±0,31 (0-1,22) | 1,62±0,68 (0,4-2,68) |
| Profondeur (en mm) | 0,32±0,21 (0-0,71) | 0,61±0,36 (0,1-1,43) | 0,84±0,65 (0,1-1,87) |
| Angulation en degré ° | 2,12±0,78 (0,9-3,64) | 4,21±4,76 (0,9-20,43) | 4,59±2,84 (1-10,66) |

- **Biais :** Nombre de forages étudiés faibles, étude in vitro sur fantômes, 5 opérateurs différents, comparaison des forages avec un système de laser inapplicable sur le vivant, mesure uniquement des forages.

Etude n°5 (25)

- **Titre :** *An advanced navigational surgery system for dental implants completed in a single visit : An in vitro study*
- **Auteurs:** Sung-Goo Kim, Woo-jin Lee, Sam-Sun Lee, Min-suk Heo, Kyung-Hoe Huh, Soon-Chul Choi, Tae-Il Kim et Won-Jin Yi
- **Année de publication:** 2014
- **Mots clés Pubmed:** Image guided surgery, navigational implant surgery, Cone Beam computed tomography
- **Type d'études:** Etudes comparative, In Vitro
- **Nombre de modèle:** 10 partiellement edentés (Basic JCP model, Korea model technology)
- **Nombre d'opérateurs:** non communiqué
- **Nobre d'implants:** 110 (disposés en 11 sites sur 10 modèles)
- **Marque d'implants :** Osstem Ts, Osstem Implants , Seoul, Korea, 4mm/10mm
- **Type d'edentement:** Unitaires communiqués
- **Marque CBCT/scanner:** implagraphy, VATECH Seoul Korea
- **Resolution Volumique:** 0,2*0,2*0,2 Voxel
- **Logiciel d'exploitation et systeme de navigation:** IGI DentX
- **Moyen de mesure :** CBCT
- **Biais de l'étude :** In vitro, résultat sur l'erreur de déviation à l'apex mais pas sur l'erreur de profondeur à l'apex.
- **Resultat :**

| Erreurs par rapport à la planification | Maxillaire | Mandibulaire | Maxillaire et Mandibulaire |
|--|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Deviation plateforme (en mm) | 0,41±0,12 (0,20-0,72) | 0,39±0,1 (0,2±0,63) | 0,41±0,12 (0,2-0,72) |
| Deviation Apex (en mm) | 0,57±0,13 (0,2-0,69) | 0,53±0,13 (0,2-0,98) | 0,56±0,14 (0,2-0,98) |
| Angle (en d°) | 2,61±1,21 (0,48-6,2) | 2,58±1,29 (0-5,84) | 2,64±1,31 (0-6,2) |

Etude n°6 (30)

- **Titre :** Verifivation of the usability of a navigation method in dental implant surgery : In vitro comparaison with the stereolithographic surgical guide template method
- **Auteurs:** Sang-Hoon Kang, Jae-Won Lee, Se-Ho Lim, Yeon-Ho Kim, Moon-Key Kim
- **Année de publication:** 2014
- **Mots clés PubMed:** Dental implants, computer-assisted surgery,surgical guide template, image guided surgery
- **Type d'étude:** Comparative , InVitro
- **Critère d'inclusion:** Oui
- **Nombre de modèle:** 2*10 mandibules (Projet 360, 3D Systems,Inc)
- **Nombre d'opérateurs :** 1
- **Nombre d'implants :** 80 (4/ modèle)
- **Marque implants :** Dentinium implants (Fx4314), 4,3mm*14mm
- **Type d'édentement :** Unitaires canines et 1^{ère} molaire gauches et droites
- **Marque CBCT/Scanner :** Siemens Sensation 54 CT scanner
- **Resolution :** /
- **Epaisseur de coupe :** 0,6mm
- **Logiciel et système d'exploitation :** Simplant software 14.0 (Materialise Dental) , et CBYON Suite navigation system (CBYON,Inc)
- **Moyen de mesure :** Scanner
- **Résultat :**

| Système exploité / Déviation par rapport à la planification | Guide chirurgical stéréolithopgraphique Canine / Molaire | CBYON Suite navigation système Canine / Molaire |
|--|--|---|
| Erreur au point d'entrée (mm) | 0,73±0,41 | 2,06±1,43 |
| | / | / |
| Erreur position apex latérale (mm) | 0,68±0,44 | 3,03±1,81 |
| | / | / |
| Profondeur apex (mm) | 2,03±0,97 | 2,76±1,03 |
| | / | / |
| Erreur angulation En d° | 1,08±0,77 | 3,31±2,07 |
| | / | / |
| | 1,52±1,31 | 1,42±1,01 |
| | / | / |
| | 0,52±0,52 | 1,96±0,93 |
| | / | / |
| | 6,72±3,41 | 12,37±1,03 |
| | / | / |
| | 3,90±2,44 | 8,97±3,83 |
| | / | / |

- **Discussion :** écart type globalement très fort signifiant une forte dispersion des mesures avec une faible reproductibilité

Etude n°7 (31)

- **Titre :** Evaluation of accuracy of insertion of dental implants and prosthetic treatment by computer-aided navigation in minipigs
- **Auteurs:** U. Meyer, H.P. Wiesmann, C. Runte, T. Fillies, N. Meier, T. Lueth, U. Joos
- **Année de publication :** 2003
- **Mots clés PubMed :** Implants, computer aided surgery, immediate loading
- **Type d'étude:** Comparative In vivo
- **Nombre d'animaux:** 2 cochons
- **Nombres opérateurs:** Non communiqués
- **Nombre d'implants:** 4*2 cochons
- **Marque implants:** Non communiqué
- **Type d'edentement:** Avulsion de 15,25,35 et 45
- **Marque CBCT:** Philips Tomoscan
- **Résolution CBCT/Scanner:** 0,35*0,35*0,5 mm
- **Type de lambeau:** Flapless
- **Logiciel et système d'exploitation:** Robodent
- **Résultat:**

| Système d'exploitation / Erreurs moyenne par rapport à la plannification | Robodent |
|---|-----------------|
| Erreurs point d'entrée | <0,5mm |
| Erreus à l'apex | <0,5mm |
| Profondeur à l'apex | <0,5mm |
| Angulations (d°) | Non communiqué |

- **Discussion:** Opération sous A.G, contrôle clinique de l'occlusion avec les nouvelles couronnes, pas de chiffres annoncés concernant l'angulation.

Etude n°8 (33)

- **Titre** : Accuracy of navigation-guided socket drilling before implant installation compared to the conventional free-hand method in a synthetic edentulous lower jaw model
- **Auteurs**: Jürgen Hoffmann, Carsten Westendorff, German Gomez-Roman, Siegmar Reinert
- **Année de publication**: 2005
- **Mots clés PubMed**: CAS, computer assisted surgery, implant surgery, navigation
- **Type d'étude**: Comparative In Vitro
- **Nombre de modèles**: 16 mandibules (polyuréthane, Sawbones Europe AB)
- **Nombres d'opérateurs** : 2 opérateurs (le 1^{er} expérimenté (op1), le 2nd novice(op2))
- **Nombres de forages** : 112 en navigation mentale (NM)et 112 en navigation dynamique(ND).
Soit 224 forages : op1(56NM +56ND)+ op2(56NM +56ND)
- **Nombres d'implants** : Aucun, mesure uniquement du forage « socket »
- **Type d'edentement** : Total, mandibule atrophique
- **Marque CBCT/Scanner** : Siemens Somatom Sensation r6
- **Epaisseur de coupe** : 0,75mm
- **Résolution** : 0,39 Voxels
- **Type lambeau** : lambeau de pleine épaisseur
- **Logiciel et système d'exploitation** : Vector Vision Compact
- **Moyen de mesure**: Scanner
- **Resultat** :

| Système exploité / Erreurs de forage par rapport à la planification | Navigation mentale | Vector Vision Compact |
|--|---------------------------|------------------------------|
| Profondeur « socket » en mm (relative au NAI) | 1,1±0,6 (0,1-2,3) | 0,7±0,5 (0,1-2,3) |
| Déviaton de l'angle En d° | 11,2±5,6 (4,1-25,3) | 4,2±1,8 (2,3-11,5) |

- **Discussion** : 2 chirurgiens avec des expériences différentes

Etude n°9 (44)

- **Titre :** *Evaluation of a navigation system for dental Implantation as a tool to train Novice Dental Practitioners*
- **Auteurs:** Nardy Casap, Sahar Nadel, Eyal Tarazi, Ervin I.Weiss
- **Année de publication:** 2011
- **Mots Clés:** Navigation system, Dental Implantation
- **Type d'étude :** Comparative, groupe témoin Vs groupe étude, In vitro (modèle)
- **Nombre opérateurs :** 40 (2 groupes de 20) étudiants
- **Nombre de modèles :** 40 mandibules
- **Nombre de forage :** 240 : 3 secteur 4 (premier temps) et 3 secteur 3 (second temps) / modèle /étudiant
- **Groupe :**
Groupe 1 navigation mentale uniquement (1er et 2nd temps)
Groupe 2 navigations dynamiques (1^{er}) puis mentale (2nd)
- **Marque des forets :** Nobel biocare drilling Kit
- **Type de forage :** Profondeur 10mm, diamètre 2 mm et 3 mm
- **Type édentement :** Bilatéral postérieur (classe I Kennedy Applegate)
- **Marque CBCT :** Brilliance CT 16 , Philips
- **Epaisseur de coupes :** 1mm (une coupe/ 0,5mm)
- **Système Navigation :** DenX (Israel)
- **3 paramètres étudiés :** Point d'impacte (marking), forage (drilling), élargissement (widening)
- **Moyen de mesure:** jauge
- **Résultat:**
 1. Temps d'exécution plus long avec la navigation dynamique (77,25 min ± 26,8min groupe 2 contre 60,75min ±16,48 minutes pour le groupe 1) Possible autocorrection des étudiants avec le système de navigation avant évaluation du praticien responsable.
 2. Résultat :

| Comparaison/ planification | Groupe 1 Mentale/Mentale | Groupe 2 Navigation /Mentale |
|--|-------------------------------------|--|
| Point d'impact (marking) Déviation par rapport à la planification en mm | 0,00mm/0,45mm±0,32mm | 0,56mm±0,41mm/ 0,66mm±0,73mm |
| Forage (drilling) Chiffre non communiqué | Pas de différence significative | 1 ^{er} temps (Nav) > 2 nd temps (mentale) |
| Elargissement (widening) Chiffre non communiqué | 1 ^{er} temps<2nd temps | Pas de différence significative |

Etude n°10 (36)

- **Titre** : Three-dimensional accuracy of implant placement in a computer-assisted navigation system
- **Auteurs** : Chiu WK, Luk WK, Cheung LK
- **Année de publication** : 2006
- **Mots clés** : Computer assisted, Navigation system, Accuracy
- **Types d'études** : In Vitro
- **Nombre de modèle** : 8 modèles mandibulaires (Trayplast, Vertex, Dentimex)
- **Type d'édentement** : Total
- **Nombres d'opérateurs** : non communiqué
- **Nombres de forages** : 80, (5 secteurs 3 et 5 secteurs 4)*8
- **Marque CBCT** : Hispeed Fx, Genrerel Electric
- **Résolution/épaisseur de coupe** : 1mm
- **Logiciel et système d'exploitation** : IGI DenX
- **Moyen de mesure** : Jauge
- **Résultats** :

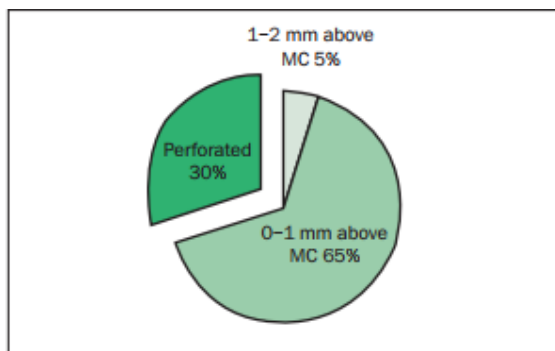


Table 1 Relationship Between Position of Drill Hole in Mandible Model and Deviation in Entry Point and Angulation

| Drill hole position | No. of drill holes | Mean deviated distance (mm) in entry point (SD) | Mean deviation (degrees) in angulation (SD) |
|---------------------|--------------------|---|---|
| 1 | 16 | 0.46 (0.56) | 3.2 (2.3) |
| 2 | 16 | 0.39 (0.61) | 4.1 (3.8) |
| 3 | 16 | 0.38 (0.58) | 3.8 (3.7) |
| 4 | 16 | 0.43 (0.60) | 4.3 (3.6) |
| 5 | 16 | 0.48 (0.53) | 4.7 (4.0) |
| Total | 80 | 0.43 (0.56) | 4.0 (3.5) |

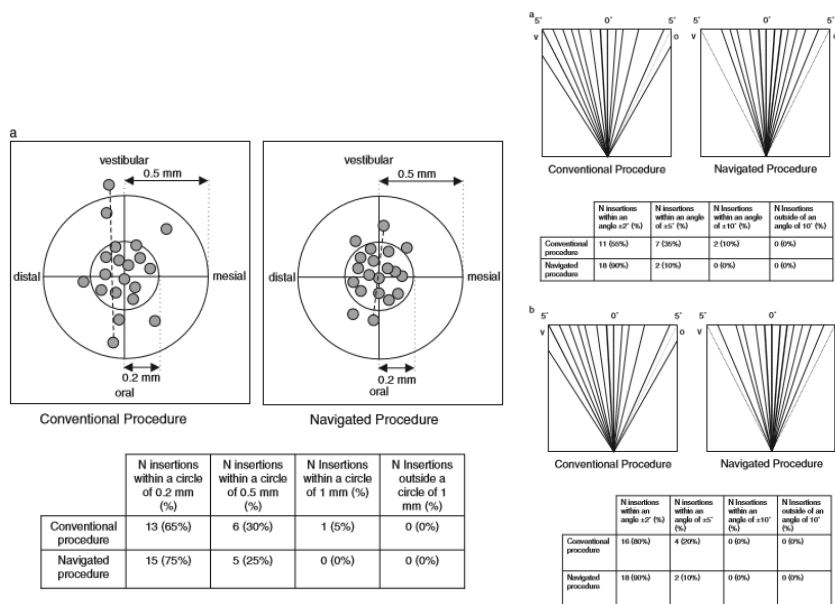
- **Biais** : Etudes in vitro, pas de seconde mesure avec un CT scan ou CBCT

Etude n°11(28)

- **Titre** : Evaluation of accuracy of computer aided intraopérative positioning of endosseous oral implants in the edentulous mandible
- **Auteurs** : Wanschitz.F, Birkfellner.W, Watzinger.F,SchopperC, Patruta S, Kainberger.S, Figl.M, Kettenbach.J, Bergmann.H, Ewers.R
- **Année de publication** : 2002
- **Type d'étude** : in vitro
- **Nombres de mandibules** : 5
- **Nombres opérateurs** : Non communiqué
- **Nombre d'implants** : 4 implants/Mandibules ; 20 implants
- **Types d'implants** : Implants cylindriques IMZ Friatec
- **Type d'édentement** : Total
- **Marque CBCT** : Philips Tomoscan 7000
- **Résolution CBCT** : 0,25*0,25*1,00 mm³ (taille Voxel)
- **Logiciel d'exploitation et système de navigation** : VISIT et camera Flashpoint
- **Moyen de mesure** : Scanner
- **Résultat** :
Au niveau de la crête mandibulaire, déviation latérale par rapport à la planification :
 - Distance implant corticale linguale : 0,49±0,38mm (0,00-1,4mm)
 - Distance implant corticale vestibulaire : 0,55±0,31mm (0,1-1,5mm)
Au niveau de l'apex de l'implant, déviation latérale par rapport à la planification :
 - Distance implant corticale linguale : 1,36±0,7mm (0,00-3,2)
 - Distance implant corticale vestibulaire : 1,44±0,79mm (0,2-3,5mm)
La déviation totale est de 0,96±0,72mm (0,00-3,5mm)
- **Biais** : Il explique que la précision s'exprime au niveau du col implantaire et pas au niveau de l'apex : la pression exercée sur l'instrument lors du forage du à la sécheresse des mandibules ainsi que la qualité osseuse, ont influé sur la déviation latérale à l'apex.

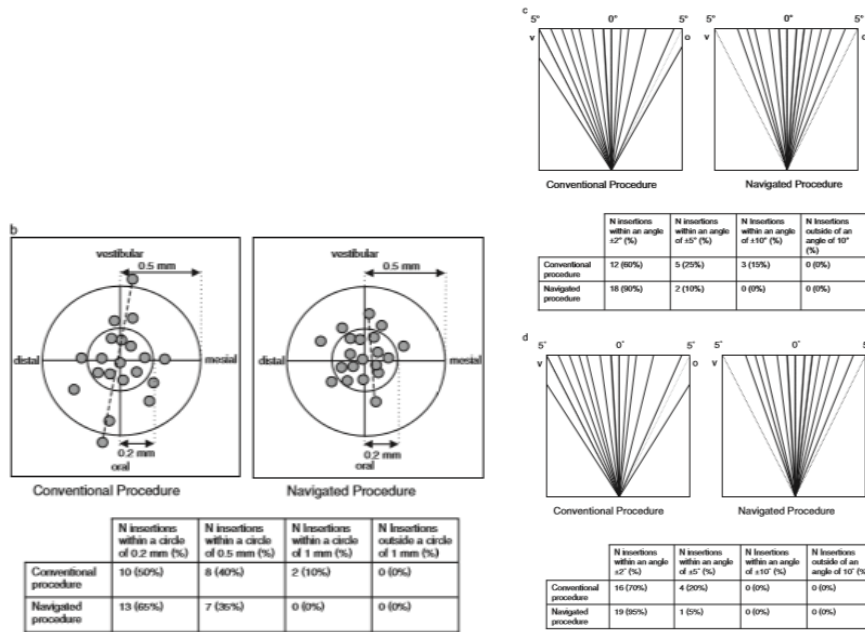
Etude n°12 (34)

- **Titre :** Navigated Vs. Conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement
- **Auteurs:** Franz-Joseph Kramer, Carola Baethge, Gwen Swennen, Steffen Rosahl
- **Année de publication :** 2004
- **Mots clés Pubmed :** Accuracy, image-guided surgery, navigation, maxilla
- **Type d'étude:** Comparative in vitro
- **Nombre de modèles:** 40 maxillaires
- **Forage par modèle :** 2 (Incisive sup Centrale gauche et canine sup droite)
- **Nombre opérateurs :** non communiqué
- **Type d'implants posés :** non communiqué (en regard de 21 : 3,75/13mm et pour 13 : 3,75/15mm)
- **Type édentement :** Extraction site en regard 21 et 13
- **Marque CBCT :** Siemens Somatom
- **Epaisseur de coupe :** 0,5mm
- **Logiciel d'exploitation et système de navigation :** IGI DenX
- **Biais :** fracture des modèles lors de l'insertion des implants, mesure des résultats avec des piliers de 40 cm de long, et mesure avec un CBCT
- **Moyen de mesure :** Scanner
- **Résultat :**
Incisive supérieure centrale gauche :



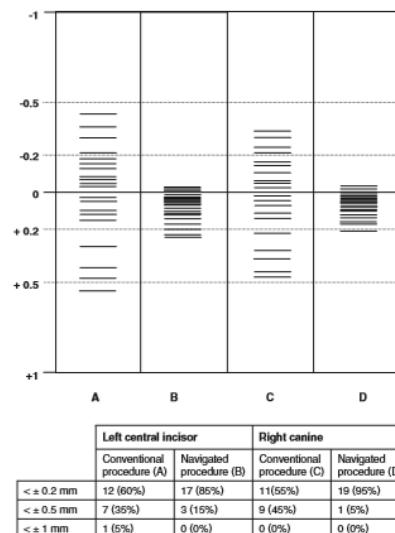
- Point d'émergence ou centrage
- Angulation Vestibulo-palatine
- Angulation Mésio-distale

Canine supérieure droite :



- Point d'émergence ou centrage
- Angulation Vestibulo-palatine
- Angulation Mésio-distale

Profondeur après implantation concernant les deux sites en comparant navigation et méthode conventionnelle :



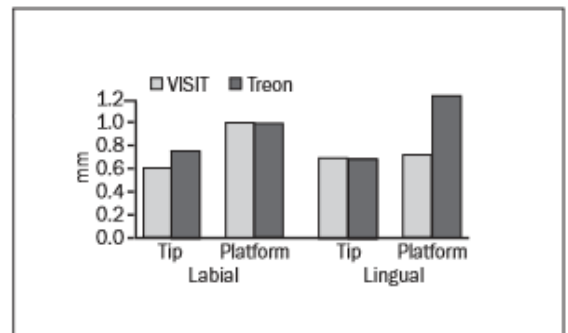
Etude n°13(48)

- **Titre** : Precision of flapless implant placement using real-time surgical navigation: a case series
- **Auteurs** : Elian.N, Jalbout ZN, Classi AJ, Wexler A, Sarment D, Tarnow TP
- **Année de publication** : 2008
- **Mots clés** : flapless, real time navigation, implant placement
- **Types d'études** : Etudes comparatives in vivo
- **Nombre de patients** : 6
- **Nombres d'opérateurs** : Non communiqué
- **Nombres d'implants** : 14
- **Type d'implants** : Non communiqué
- **Type d'édentement** :
 - Patient 1** : Incisives centrales maxillaire droite et gauche
 - patient 2** : seconde prémolaire maxillaire droite
 - patient 3** : première prémolaire mandibulaire gauche
 - patient 4** : première molaire et première et seconde prémolaire mandibulaire droite
 - patient 5** : premières molaires et premières et secondes prémolaires mandibulaires droites et gauches
 - patient 6** : incisives latérale mandibulaire droite
- **Marque CBCT/Scanner** : Non communiqué
- **Résolution/épaisseur de coupe** : non communiqué
- **Logiciel et système d'exploitation** : IGI, DenX
- **Moyen de mesure** : Scanner
- **Résultats** :
 - Déviation moyenne col implantaire : $0,89\pm 0,53$
 - déviation moyenne au niveau de l'apex de l'implant : $0,96\pm 0,50$
 - déviation moyenne de l'angulation : $3,78\pm 2,76$
- **Biais** : Nombre de patients très faible

Etude n°14 (22)

- **Titre** : Prospective randomized clinical comparison of 2 dental implant navigation system
- **Auteurs** : G.Wittwer, Wasiu Lanre Adeyemo, Kurt Schicho, Wolfgang Birkefelle, Georg Enislidis
- **Année de publication** : 2007
- **Mots clés** : Accuracy, dental implants, computer assisted navigation
- **Types d'études** : Prospective randomisée, in vivo
- **Nombre de patient** : 16
- **Nombre d'opérateur** : 1
- **Type d'edentement** : Mandibules édentées depuis plus d'un an
- **Nombre d'implants** : 64 , 4 implants/ patient
- **Types d'implants** : Ankylos Dentsply
- **Marque CBCT** : Philips Brilliance 16 power, Mx8000 IDT
- **Résolution/épaisseur de coupe** : Voxel 0,17*0,17*0,75
- **Logiciel et système d'exploitation** : 8 patients avec VISIT (camera Flashpoint) et 8 patients avec Stealthstation Treon (camera Polaris)
- **Moyen de mesure** : CBCT
- **Résultats** :

| | Labial deviation | | | Lingual deviation | | |
|--------------------------------|------------------|-----|------------|-------------------|-----|------------|
| | Average | SD | Range | Average | SD | Range |
| VISIT navigation system | | | | | | |
| Implant top | 0.6 | 0.2 | 0.3 to 0.9 | 0.7 | 0.3 | 0.3 to 1.0 |
| Implant platform | 1.0 | 0.5 | 0.3 to 2.0 | 0.7 | 0.3 | 0.3 to 1.2 |
| Treon | | | | | | |
| Implant top | 0.8 | 0.6 | 0.0 to 2.0 | 0.7 | 0.5 | 0.0 to 1.6 |
| Implant platform | 1.0 | 0.5 | 0.1 to 2.4 | 1.2 | 0.8 | 0.1 to 3.4 |



- **Biais** : Petit échantillon

Etude n°15(29)

- **Titre :** *Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology : optical tracking vs. stéréolithographic splint systems*
- **Auteurs:** Jörg Ruppin, Aleksandra Popovic, Mario Strauss, Elmar Spüntrup, Alexander Steiner, Christian Stoll
- **Année de publication :** 2008
- **Mots clés Pubmed :** Dental implantology , accuracy, computer aided surgery
- **Type d'étude :** Comparative in vitro sur cadavre humain
- **Nombre de cadavre :** 20 (mandibules partiellement et totalement édentées)
- **Critère d'inclusion :** Oui
- **Marque implants :** Branemark MK II, Nobel Biocare
- **Nombre d'implants posés :** 40/groupes (40*3 groupes)
- **Marque CBCT :** Somatom plus 4, Siemens AG
- **Epaisseur de coupe et Voxel :** non communiqué (Une coupe/ 0,5mm) et 0,3*0,3*1mm
- **Logiciel d'exploitation et système de navigation :**
 1. Groupe 1 : simplant one shot
 2. Groupe 2 : Robodent Lap doc Accedo
 3. Groupe 3 : Artma virtual patient
- **Marque camera optique :** NDI Polaris
- **Moyen de mesure :** Scanner
- **Resultat :**

| Système et logiciel d'exploitation / Mesures Erreurs | Simplant/Surgi guide | Robodent LapDoc | Artma Virtual Patient |
|---|-----------------------------|------------------------|------------------------------|
| Angulation implants En degré ° | 7,9±5 (1-18,25) | 8,1±4,6 (2-23,5) | 8,1±4,9 (1,5-18) |
| Profondeur apex en mm | 0,6±0,4 (0-1,4) | 0,6±0,3 (0-3,1) | 0,8±0,7 (0-1,1) |
| Point d'entrée (déviation horizontale) en mm | 1,5±0,8 (0,1-3,5) | 1±0,5 (0,2-2,9) | 1,2±0,6 (0,2-2,4) |

- **Biais possible de la navigation dynamique**
 1. **Biais Intrinsèques :**
 - Résolution du CBCT
 - Traitement des données d'images
 - Logiciel de planification
 - Erreurs d'enregistrements
 - Erreurs de localisation optique
 2. **Biais extrinsèques :**
 - Opérateur dépendant

Etude n°16(37)

- **Titre :** Dental implant navigation system guide, the surgery futur
- **Auteurs :** Thing-Mao Sun, Thin-Hsun Lan, Chin-Yun Pan, Huey-Er Lee
- **Année de publication:** Décembre 2017
- **Mots clés Pub Med:** Dental navigation, learning curve, Accuracy
- **Types d'études:** comparative In vitro
- **Nombre de modèles:** 25 sets, 1 sets= mandibule+maxillaire
- **Nombre d'opérateurs :** 5 (1 opérateur pour 5 sets)
- **Nombres d'implants :** 150 (3 par arcades)
- **Types d'édentement :** Maxillaire : 11, 17, 26 et Mandibulaire 31, 36, et 47
- **Type d'implants :** non communiqués, implant antérieur Ø2mm/10mm et postérieur Ø2mm/8mm
- **Marque CBCT/scanner :** Non communiqué
- **Résolution :** Non communiqué
- **Moyen de mesure :** CT scan
- **Système de navigation :** AQ Navi surgica system
- **Résultat :**

Table 2 Deviation of total, longitudinal, and angular errors between the maxillary and mandible.

| | Maxillary | | Mandible | | P-value |
|-------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|---------------------|
| | Mean ± SD | 95%CI | Mean | 95%CI | |
| Total error (mm) | 1.33 ± 0.43 | 1.21–1.45 | 1.21 ± 0.56 | 1.09–1.32 | 0.1501 |
| Longitudinal error (mm) | 0.87 ± 0.68 | 0.69–1.05 | 1.29 ± 0.88 | 1.11–1.46 | 0.0012 ^a |
| Angular error (degrees) | 3.18 ± 1.21 | 2.89–3.46 | 2.92 ± 1.28 | 2.64–3.21 | 0.2147 |

CI: Confidence level.
^a Students' *t* test.

- **Discussion**
- plus l'utilisation est fréquente et plus le temps opératoire diminue.
- la différence de précision obtenue au maxillaire n'est pas significativement différente de la précision obtenue à la mandibule .

Table 1 Deviation of the total, longitudinal, and angular errors in the 5 drilling tests.

| | 1st | | 2nd | | 3rd | | 4th | | 5th | | P-value ^a | Multiple comparison |
|--------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|----------------------|---|
| | Mean ± SD | 95%CI | Mean ± SD | 95%CI | Mean ± SD | 95%CI | Mean ± SD | 95%CI | Mean ± SD | 95%CI | | |
| Total error | 1.36 ± 0.56 | 1.18–1.55 | 1.12 ± 0.52 | 0.94–1.30 | 1.26 ± 0.45 | 1.07–1.44 | 1.33 ± 0.41 | 1.15–1.51 | 1.29 ± 0.55 | 1.11–1.47 | 0.3940 | |
| Longitudinal error | 1.66 ± 0.99 | 1.38–1.92 | 0.98 ± 0.81 | 0.70–1.25 | 1.14 ± 0.53 | 0.87–1.41 | 0.84 ± 0.75 | 0.57–1.11 | 0.77 ± 0.63 | 0.50–1.05 | <0.0001 ^b | 1st vs 4th (0.0335) 1st vs 5th (0.0142) |
| Angular error | 3.68 ± 1.28 | 3.24–4.12 | 3.08 ± 1.37 | 2.63–3.51 | 3.05 ± 1.08 | 2.60–3.48 | 2.77 ± 1.05 | 2.33–3.21 | 2.67 ± 1.26 | 2.24–3.11 | 0.0164 ^b | 1st vs 2nd (0.0060) 1st vs 4th (0.0005) 1st vs 5th (0.0001) |
| Elapsed time | 90 | | 78 | | 72 | | 67 | | 56 | | | |

CI: Confidence level.
^a Using one-way ANOVA.
^b Tukey–Kramer HSD.

- La précision semble varier en fonction de la localisation du site à implanter sur l'arcade.
- La courbe d'apprentissage nécessite 5 tentatives dans cette étude pour atteindre une asymptote.

5.2 Bibliographie

1. Robot dentist is first to fit implants without a human touch [Internet]. South China Morning Post. 2017 [cité 20 février 2018]. Disponible sur: <http://www.scmp.com/news/china/article/2112197/chinese-robot-dentist-first-fit-implants-patients-mouth-without-any-human>
2. Gaviria L, Salcido JP, Guda T, Ong JL. Current trends in dental implants. *J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg.* 2014;40(2):50-60.
3. SAC Assessment Tool [Internet]. ITI International Team for Implantology. [cité 20 févr 2018]. Disponible sur: <https://www.iti.org/SAC-Assessment-Tool>
4. J-P Lacoste. Guide pratique d'implantologie - Elsevier Masson - Livres, , revues et traités EMC pour toutes spécialités médicales et paramédicales [Internet]. 2013 [cité 20 févr 2018]. Disponible sur: <https://www.elsevier-masson.fr/guide-pratique-dimplantologie-9782294730856.html>
5. Linkow LI. The pterygoid extension implant for the totally and partially edentulous maxillae. *Int J Orthod.* 1974;12(3):9-19.
6. Lekholm U, Zarb GA, Albrektsson T. Patient selection and preparation. Tissue integrated prostheses. Chicago Quintessence; 1985;199-209.
7. Eriksson AR, Albrektsson T. Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: a vital-microscopic study in the rabbit. *J Prosthet Dent.* 1983;50(1):101-7.
8. Albrektsson T, Zarb G, Worthington P, Eriksson AR. The long-term efficacy of currently used dental implants: a review and proposed criteria of success. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 1986;1(1):11-25.
9. Pauwels R, Araki K, Siewerdsen JH, Thongvigitmanee SS. Technical aspects of dental CBCT: state of the art. *Dento Maxillo Facial Radiol.* 2015;44(1):20140224.
10. Venkatesh E, Elluru SV. Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry. *J Istanb Univ Fac Dent.* 2017;51(3 Suppl 1):S102-21.
11. Haute Autorité de Santé - Tomographie volumique a faisceau conique de la face (cone beam computerized tomography) [Internet]. [cité 21 février 2018]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_899074/fr/tomographie-volumique-a-faisceau-conique-de-la-face-cone-beam-computerized-tomography
12. Jabero M, Sarment DP. Advanced surgical guidance technology: a review. *Implant Dent.* 2006;15(2):135-42.
13. Miller RJ, Bier J. Surgical navigation in oral implantology. *Implant Dent.* 2006;15(1):41-7.
14. Vercrijssen M, Fortin T, Widmann G, Jacobs R, Quirynen M. Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: modalities and indications. *Periodontol 2000.* 2014;66(1):214-27.

15. Compston A. The structure and functions of the cerebellum examined by a new method. By Sir Victor Horsley, FRS, FRCS and R.H. Clarke, MA, MB. *Brain*. 12007;130(6):1449-52.
16. D'haese J, Ackhurst J, Wismeijer D, De Bruyn H, Tahmaseb A. Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontol 2000*.2017;73(1):121-33.
17. Ewers R, Schicho K, Truppe M, Seemann R, Reichwein A, Figl M, et al. Computer-aided navigation in dental implantology: 7 years of clinical experience. *J Oral Maxillofac Surg*. 2004;62(3):329-34.
18. Herklotz I, Beuer F, Kunz A, Hildebrand D, Happe A. Navigation in implantology. *Int J Comput Dent*. 2017;20(1):9-19.
19. Seeberger R, Kane G, Hoffmann J, Eggers G. Accuracy assessment for navigated maxillo-facial surgery using an electromagnetic tracking device. *J Cranio-Maxillo-fac Surg*. 2012;40(2):156-61.
20. Armand S, Legac O, Galibourg A. Computer-aided implantology: Contribution of the Robodent(®) passive robotic system. *Rev Stomatol Chir MaxilloFac Chir Orale*.2013;114:247-254
21. Casap N, Wexler A, Eliashar R. Computerized navigation for surgery of the lower jaw: comparison of 2 navigation systems. *J Oral Maxillofac Surg* .2008;66(7):1467-75.
22. Wittwer G, Adeyemo WL, Schicho K, Birkfellner W, Enislidis G. Prospective randomized clinical comparison of 2 dental implant navigation systems. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2007;22(5):785-90.
23. Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res*.2005;16(4):495-501.
24. Siessegger M, Schneider BT, Mischkowski RA, Lazar F, Krug B, Klesper B, et al. Use of an image-guided navigation system in dental implant surgery in anatomically complex operation sites. *J Cranio-Maxillo-fac Surg*.2001;29(5):276-81.
25. Kim S-G, Lee W-J, Lee S-S, Heo M-S, Huh K-H, Choi S-C, et al. An advanced navigational surgery system for dental implants completed in a single visit: An in vitro study. *J Cranio-Maxillofac Surg*.2015;43(1):117-25.
26. Somogyi-Ganss E, Holmes HI, Jokstad A. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clin Oral Implants Res*.2015;26(8):882-90.
27. Emery RW, Merritt SA, Lank K, Gibbs JD. Accuracy of dynamic navigation for dental implant placement-model-based evaluation. *J Oral Implantol*. 2016;42(5):399-405.
28. Wanschitz F, Birkfellner W, Watzinger F, Schopper C, Patruta S, Kainberger F, et al. Evaluation of accuracy of computer-aided intraoperative positioning of endosseous oral implants in the edentulous mandible. *Clin Oral Implants Res*. 2002;13(1):59-64.
29. Ruppin J, Popovic A, Strauss M, Spüntrup E, Steiner A, Stoll C. Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology: optical tracking vs. stereolithographic splint systems. *Clin Oral Implants Res*. 2008;19(7):709-16.

30. Kang S-H, Lee J-W, Lim S-H, Kim Y-H, Kim M-K. Verification of the usability of a navigation method in dental implant surgery: In vitro comparison with the stereolithographic surgical guide template method. *J Cranio-Maxillofac Surg.* 2014;42(7):1530-5.
31. Meyer U, Wiesmann HP, Runte C, Fillies T, Meier N, Lueth T, et al. Evaluation of accuracy of insertion of dental implants and prosthetic treatment by computer-aided navigation in minipigs. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2003;41(2):102-8.
32. Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant placement is more accurate using dynamic navigation. *J Oral Maxillofac Surg.* 2017;75(7):1377-86.
33. Hoffmann J, Westendorff C, Gomez-Roman G, Reinert S. Accuracy of navigation-guided socket drilling before implant installation compared to the conventional free-hand method in a synthetic edentulous lower jaw model. *Clin Oral Implants Res.* 2005;16(5):609-14.
34. Kramer F-J, Baethge C, Swennen G, Rosahl S. Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement. *Clin Oral Implants Res.* 2005;16(1):60-8.
35. Casap N, Laviv A, Wexler A. Computerized navigation for immediate loading of dental implants with a prefabricated metal frame: a feasibility study. *J Oral Maxillofac Surg.* 2011;69(2):512-9.
36. Chiu W-K, Luk W-K, Cheung L-K. Three-dimensional accuracy of implant placement in a computer-assisted navigation system. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2006;21(3):465-70.
37. Sun T-M, Lan T-H, Pan C-Y, Lee H-E. Dental implant navigation system guide the surgery future. *Kaohsiung J Med Sci.* 2018;34(1):56-64.
38. Gundle KR, White JK, Conrad EU, Ching RP. Accuracy and Precision of a Surgical Navigation System: Effect of Camera and Patient Tracker Position and Number of Active Markers. *Open Orthop J.* 2017;11:493-501.
39. Boeckx P, Essig H, Kokemuller H, Tavassol F, Gellrich NC, Swennen GRJ. Presentation and Evaluation of a Modified Wax-Bite Dental Splint for Surgical Navigation in Craniomaxillofacial Surgery. *J Oral Maxillofac Surg.* 2015;73(11):2189-95.
40. Kawachi H, Kawachi Y, Ikeda C, Takagi R, Katakura A, Shibahara T. Oral and maxillofacial surgery with computer-assisted navigation system. *Bull Tokyo Dent Coll.* 2010;51(1):35-9.
41. Lee TYT, Zaid WS. Broken dental needle retrieval using a surgical navigation system: a case report and literature review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2015;119(2):e55-59.
42. Stein KM. Use of Intraoperative Navigation for Minimally Invasive Retrieval of a Broken Dental Needle. *J Oral Maxillofac Surg.* 2015;73(10):1911-6.
43. Sukegawa S, Kanno T, Shibata A, Matsumoto K, Sukegawa-Takahashi Y, Sakaida K, et al. Use of an intraoperative navigation system for retrieving a broken dental instrument in the mandible: a case report. *J Med Case Reports [Internet].* 15 janvier 2017 [cité 22 février 2018];11. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5237551/>
44. Casap N, Nadel S, Tarazi E, Weiss EI. Evaluation of a navigation system for dental implantation as a tool to train novice dental practitioners. *J Oral Maxillofac Surg.* 2011;69(10):2548-56.

45. Block MS, Emery RW. Static or Dynamic Navigation for Implant Placement-Choosing the Method of Guidance. *J Oral Maxillofac Surg.* 2016;74(2):269-77.
46. Dragan I. Dynamic Navigation in Implant Dentistry - LIVING WITH DENTAL IMPLANTS AND THE FUTURE [Internet]. Coursera. 2017 [cité 27 mars 2018]. Disponible sur: <https://fr.coursera.org/learn/implant-dentistry/lecture/YStl6/dynamic-navigation-in-implant-dentistry>
47. Wittwer G, Adeyemo WL, Schicho K, Gigovic N, Turhani D, Enislidis G. Computer-guided flapless transmucosal implant placement in the mandible: a new combination of two innovative techniques. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.*2006;101(6):718-23.
48. Elian N., Jalbout ZN., Classi AJ, Wexler A, Sarment D, Tarnow TP. Precision of flapless implant placement using real-time surgical navigation: a case series. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 20 février 2018]. Disponible sur: <https://scihub.tw/https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19216283>

5.3 Registre des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Facteurs de risques Esthétiques | 15 |
| Tableau 2: Facteurs de risque anatomique et fonctionnel | 15 |
| Tableau 3: Facteurs de risque lié au protocole de mise en charge et à la prothèse provisoire | 16 |
| Tableau 4: Densité, Hounsfield et Tissus..... | 23 |
| Tableau 5: Dose effective en fonction du type d'imagerie, HAS 2102..... | 26 |
| Tableau 6: Niveau de preuve..... | 35 |
| Tableau 7: Résumé des 16 études sélectionnées..... | 37 |
| Tableau 8: Mesures de Précisions des 16 études sélectionnées | 38 |
| Tableau 9: Déviation au niveau du col implantaire ou point d'entrée du forage par rapport à la planification, a | 39 |
| Tableau 10: Déviation ou erreur à l'apex par rapport à la planification | 40 |
| Tableau 11: Déviation Angulaire par rapport à la planification | 41 |
| Tableau 12: Erreur de profondeur à l'apex par rapport à la planification | 42 |
| Tableau 13: Invasivité et type d'attache | 48 |
| Tableau 14 précision en fonction du support des marqueurs | 49 |
| Tableau 15: Inconvénients des différentes navigations implantaires..... | 49 |
| Tableau 16: Avantages et inconvénients de la navigation passive | 50 |
| Tableau 17: Indications de la navigation dynamique..... | 52 |

5.4 Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Relation entre projet prothétique et position de l'implant | 17 |
| Figure 2: réalisation d'un wax-up | 17 |
| Figure 3: Les voies aboutissants à la planification numérique..... | 18 |
| Figure 5: Coupe sagittale, Canal incisif, <i>F.Netter, Elsevier Masson</i> | 19 |
| Figure 4: Vue sagittale, Sinus maxillaire, <i>F.Netter, Elsevier Masson</i> | 19 |
| Figure 6: Coupe sagittale os maxillaire et sinus maxillaire , <i>F.Netter, Elsevier Masson</i> | 20 |
| Figure 7: Vue Frontale os cranien, <i>F.Netter, Elsevier Masson</i> | 21 |
| Figure 8: Coupe sagittale mandibulaire, <i>F.Netter, Elsevier Masson</i> | 22 |
| Figure 9: Classification de lekholm et Zarb | 23 |
| Figure 10: Continuum 2018, Dr R.Noharet..... | 27 |
| Figure 11: Continuum 2018, Dr R.Noharet..... | 27 |
| Figure 12, Continum 2018, D R.Noharet | 27 |
| Figure 13: Ergonomie de l'interface et marqueurs, système Navident | 30 |
| Figure 14: Les marqueurs optiques ou "Trackers", système Navident | 32 |
| Figure 15: Ecran de Navigation , système Navident..... | 33 |

TREGOUET (Yves-marie).- Intérêt clinique de la navigation implantaire dynamique, le point sur la littérature.

77P. ;15 ill. ; 17 tabl. ; 48 ref. ; 30cm (Thèse : Chir. Dent. ; Nantes ; 2018)

Résumé :

Depuis les années 1970 et les travaux de Bränemark, la pratique implantaire s'est largement développée. L'évolution de l'imagerie tridimensionnelle et les progrès informatiques ont permis de simplifier et d'optimiser la phase chirurgicale implantaire.

Les logiciels de planifications 3D, ont rendu possible l'émergence de différents guides chirurgicaux, dont l'objectif est de faire coïncider l'axe implantaire souhaité avec la réalité clinique.

Nous nous sommes intéressés à l'un d'entre eux : Les guides chirurgicaux dynamiques.

Pour tenter de répondre aux problématiques de précisions, de dégager les avantages et inconvénients du dispositif, ainsi que de poser des indications à l'utilisation de celui-ci, nous avons réalisé une revue de la littérature traitant du sujet.

RUBRIQUE DE CLASSEMENT : Implantologie

MOTS CLES MESH

Pose d'implant dentaire- Dental implantation.

Chirurgie assistée par ordinateur- Suegery, computer assisted

Imagerie tridimensionnelle- Imaging three-dimensional

JURY

Président : M. Le Professeur Bernard Giumelli

Assesseur : M. Le Docteur François Bodic

Assesseur : M. Le Docteur Amine Abbas

Invité : M. Le Docteur Philippe Laperche

Directeur de thèse : M. Le Docteur Alain Hoornaert

ADRESSE DE L'AUTEUR

20 rue Saint Lazare, 75009 PARIS

Ym.tregouet@hotmail.fr